Über Steiggebiete des Luftdruckes bei russischen Kältewellen

(Ein Beitrag zur Erklärung der Luftdruckschwankungen am Boden)

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung der Doktorwürde

Genehmigt von der Philosophischen Fakultät

der Friedrich-Wilhelms-Universität zu Berlin

von

Hellmut Wagemann

aus Bebra bei Kassel

Tag der Promotion: 14. Mai 1929

Berlin 1929

Julius Springer

Referenten: Professor Dr. von Ficker
Professor Dr. Hellmann

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Inhalt.

Seite

A) I. Beschreibung der Untersuchungsmethode 5

II. Zusammenstellung der in dieser Arbeit benutzten Ergebnisse bisheriger Untersuchungen über Kältewellen 9

B) I. Die Steiggebiete beim Auftreten der Kältewelle 10

a) Die Kältewelle entstand im Beobachtungsgebiet 10

b) Die Kältewelle erschien am Eismeer mit Ostwinden 17

c) Die Kältewelle erschien am Eismeer mit Nordwestwinden 20

d) Zusammenstellung der bisher gefundenen Ergebnisse 22

II. Die Steiggebiete bei der Wanderung der Kältewelle durch Rußland, Zentralasien und Westsibirien 25

a) Bei der Wanderung der Kältewelle trat nur ein Steiggebiet auf 25

b) Bei der Wanderung der Kältewelle traten mehrere Steiggebiete auf 27

1. Die Kältewelle teilte sich nicht in verschiedene Teile 27

α) Die Steiggebiete ordneten sich an der Front der Kaltluft wellenförmig an 28

β) Die Steiggebiete traten hinter der Kältewelle in Intervallen auf (Etappenweises Vorrücken der Kaltluft). . . 35

2. Die Kältewelle teilte sich in verschiedene Teile 42

III. Die Steiggebiete beim Verschwinden der Kältewelle 48

C) I. Zusammenfassung der gewonnenen Ergebnisse 52

II. Einige Bemerkungen zu einer Arbeit von F. Gölles über den Luftdruckgang bei Kältewellen im Gebiet des Kaspischen Meeres 55

Literaturverzeichnis 56

Anhang: Isallobarenkarten Nr. 1—36 57

A) I. Beschreibung der Untersuchungsmethode.

Durch die Arbeiten von Bjerknes ist die Aufmerksamkeit der Meteorologen in erhöhtem Maße auf die Diskontinuitätsflächen in der Atmosphäre, besonders auf die Trennungsfläche zwischen der kalten Polarluft und der warmen Tropikluft gelenkt worden. Der Ablauf des Wetters ist eng an diese Diskontinuitätsflächen geknüpft. Die Erfolge, die man mit Hilfe der neueren Anschauungen bei der Vorhersage von Temperatur, Bewölkung und Niederschlägen in der praktischen Meteorologie erzielt hat, haben zu ihrer allgemeinen Anerkennung geführt.

Erheblich schwieriger, in Westeuropa in den meisten Fällen sogar fast unmöglich ist es jedoch, mit Hilfe der Bjerknesschen Anschauungen die Verteilung des Luftdruckes in einem bestimmten Zeitpunkt zu erklären und wenn möglich zu extrapolieren. Dies ist, wie Ficker[3])*) vermutet, dadurch bedingt, daß sich im Gange des Luftdruckes die Druckeffekte zweier verschiedener Niveaus in ganz besonderem Maße ausprägen. Einmal ist dies die Troposphäre, besonders ihre untersten drei Kilometer. Hier gilt das von Bjerknes entworfene Schema. Das andere Niveau, das für das Zustandekommen der Druckschwankungen von besonderer Bedeutung sein soll, findet sich in höheren Schichten und umfaßt wahrscheinlich den unteren Teil der Stratosphäre.

In der vorliegenden Arbeit wird versucht, einen Beitrag zur Erklärung der Druckschwankungen zu liefern, indem hierzu ein Verfahren benutzt wird, das bisher noch nicht angewandt wurde.

Die zahlreichen Arbeiten, die sich mit dem Zustandekommen der Schwankungen des Luftdruckes befaßt haben, haben in der Mehrzahl die folgende Methode angewandt: Aus Bergbeobachtungen oder aerologischen Beobachtungen wurden von den unteren Atmosphärenschichten, soweit dies die Beobachtungen zuließen, die Temperaturänderungen während eines bestimmten Zeitraumes ermittelt. Mit Hilfe der barometrischen Höhenformel rechnete man hieraus den Druckeffekt dieser Schichten aus und verglich ihn mit den tatsächlich eingetretenen Druckänderungen. Man zerlegte auf diese Weise die beobachtete Barometeränderung am Erdboden in zwei Teile, einmal in eine Komponente, die durch die Temperaturänderungen der untersten Atmosphärenschichten hervorgerufen wurde, und eine zweite, deren Ursachen über der höchsten, jeweils zur Berechnung der Temperaturänderungen herangezogenen Schicht zu finden sein mußten. Die Methode, von den beobachteten Änderungen des Luftdruckes jene zu subtrahieren, die durch Temperaturänderungen in den untersten Luftschichten entstanden waren, um so die aus den höheren Schichten stammende Komponente darzustellen, wollen wir auch in dieser Arbeit benutzen. Jedoch wollen wir zur Ermittelung der Temperaturänderungen einen bisher unbegangenen Weg einschlagen; denn die bisherige Arbeitsweise hat einen empfindlichen Nachteil, der in dem heutzutage vorhandenen aerologischen Material begründet ist. Die meisten Aufstiege mit Registrierinstrumenten sind zu niedrig, und sie weisen große zeitliche Lücken auf. Ferner werden sie nur an verhältnismäßig wenig Stationen durchgeführt. Infolgedessen hat man nach dieser Methode einzelne Wetterlagen kaum untersuchen können. Man war auf Mittelbildung angewiesen, günstigsten Falles konnte man an einer bestimmten Station während eines kurzen Zeitraumes den Druckgang an dieser Station zerlegen, mußte also das Nebeneinander im Raum durch die Erforschung des zeitlichen Nacheinander ersetzen. Diese Methode hat eine gewisse Ähnlichkeit mit der Doveschen Arbeitsweise, die

*) Die im Texte vorkommenden hochgestellten Zahlen mit Klammer weisen auf das am Schluß angeführte Literaturverzeichnis hin, in dem die betreffende Arbeit unter dieser Nummer zu finden ist.

sich ja auch mit dem Ablauf irgendwelcher meteorologischer Elemente an einem bestimmten Punkt der Erdoberfläche befaßte. Ihr haften infolgedessen auch alle Mängel an, die die Dovesche Arbeitsweise im Vergleich zu der heutigen synoptischen charakterisieren.

Hiermit soll aber der Methode, die sich der Höhenbeobachtungen zur Ermittelung der Temperaturänderungen bedient, keinesfalls der Vorwurf der Unbrauchbarkeit gemacht werden. Sie ist im Gegenteil die einzige Methode, die uns eine einwandfreie Aufklärung über die Luftdruckverhältnisse der höheren Luftschichten gewährt. Man wird alle Ergebnisse, die man mit Hilfe anderer Methoden gefunden hat, mit dieser nachprüfen müssen, sobald die Höhenbeobachtungen genügend zahlreich sind, um das synoptische Bild höherer Niveaus Tag für Tag mit einiger Zuverlässigkeit zu entwerfen. Heutzutage und in absehbarer Zukunft ist dies aber noch nicht der Fall. Will man also nicht auf die synoptische Behandlung und deren große Vorteile zunächst überhaupt verzichten, so ist man schon auf Methoden angewiesen, die zulassen, aus den Verhältnissen an der Erdoberfläche, für die ein genügend dichtes Netz von Beobachtungen vorhanden ist, einen Schluß auf die darüberliegenden Luftschichten zu ziehen.

Das nächstliegende ist nun, die Temperaturänderungen in dem größten Teil der Troposphäre denen an der Erdoberfläche gleichzusetzen, wenn auch nicht der Größe, so doch wenigstens dem Vorzeichen nach. Während im Einzelfall hierbei Fehler unvermeidlich sind, werden Mittelbildungen über einen größeren Zeitraum oder die Beobachtung von Temperaturänderungen über größeren Gebieten den wirklichen Erscheinungen ziemlich nahe kommen. Die erste Art ist z. B. von Ficker im ersten Teil seiner für die Frage der komplexen Druckschwankungen grundlegenden Arbeit über Beziehungen zwischen Änderungen des Luftdruckes und der Temperatur[3]) angewandt worden. Die zweite Art fand Anwendung in einer Abhandlung von Defant, die sich mit der Beziehung der synoptischen Luftdruckänderungen zu den Temperaturverhältnissen der Atmosphäre[1]) befaßte. Die Mittelbildung schließt jedoch aus, daß man mit dieser Methode einzelne Wetterlagen oder die Verhältnisse an einer Station eingehend erforschen kann.

Nun hat uns aber die moderne Meteorologie gelehrt, daß die schroffsten und stärksten Temperaturänderungen in der Troposphäre ziemlich gleichzeitig in einer Schicht von mehreren Kilometern Höhe vor sich gehen, daß sie im wesentlichen auf den Vorübergang warmer und kalter Luftmassen zurückzuführen sind, die durch eine scharf ausgeprägte Diskontinuitätsfläche voneinander getrennt werden. Man wird also schon heute die Herkunft der Druckschwankungen bei einzelnen Wetterlagen synoptisch untersuchen können, wenn man ihre horizontale Verteilung, die Steig- und Fallgebiete des Luftdruckes, mit den Diskontinuitätslinien an der Erdoberfläche in Verbindung bringt. Hinter einer Kaltfront, der Begrenzung vordringender kalter Luft, wird man stärkstes Steigen des Barometers, vor einer Warmfront, als der Begrenzung vordringender Warmluft, wird man ein Fallen des Barometers zu erwarten haben. Man vergleicht nun an Hand der Beobachtungen, wie weit das einfachste Schema in Wirklichkeit zutrifft und wie geartete Abweichungen vorkommen.

Diese Methode wird im folgenden angewandt werden, doch wollen wir uns auf die Untersuchung der Steiggebiete bei russischen Kältewellen beschränken. Es soll hierfür eine kurze Begründung gegeben werden.

Die Extrapolation vom Erdboden in die Höhe ist bei Kaltluft viel exakter durchführbar, da wir es hier mit einer Luftmasse zu tun haben, die immer bestrebt ist, sich infolge ihrer größeren Dichte am Erdboden auszubreiten, während eine warme Luftmasse das Bestreben hat, in die Höhe zu steigen. Wann über einem Beobachtungsorte der Ersatz kalter Luft durch warme Luft beginnt, ist aus den Anderungen der Temperatur und den Winden am Erdboden kaum festzustellen. Auch die üblichen Bewölkungsbeobachtungen liefern uns dafür keine einwandfreien Kriterien. Anders ist es dagegen bei dem Vordringen kalter Luft. Der Blick auf das moderne Depressionsschema, das in jedem neueren Lehrbuch der Meteorologie, sei es mehr wissenschaftlich oder mehr populär, zu finden ist, zeigt dies sofort. Zuerst bricht die Kaltluft in den unteren Schichten ein, hier geht zuerst der Windsprung vor sich. Das Eintreffen der Kaltluft ist häufig von Böen und Gewittern begleitet, Erscheinungen, die der Aufmerksamkeit des Beobachters viel seltener entgehen als die ersten ci-Schleier, die Anzeichen beginnender zyklonaler Erwärmung in den höheren Schichten. Da der Einbruch kalter Luft aus physikalischen Gründen ein Steigen des Barometers hervorrufen muß, können wir also auch ziemlich exakt den Beginn des Steigens festlegen, allerdings geben uns die Bodenbeobachtungen andererseits nur selten eine Erklärung für sein Aufhören und für den Ubergang zum Fallen auf der Rückseite einer Kältewelle. Aus diesem Grunde wird man sich in der Hauptsache auf die Untersuchung der Verhältnisse beim Einbruch kalter Luft beschränken.

Vor der Front heranströmender Kaltluft haben wir in den meisten Fällen auch ein Barometerfallgebiet. Da man aber für sein Zustandekommen keine sichere Erklärung hat, schaltet es von vornherein bei unseren Betrachtungen aus. Zum Teil gilt hierfür auch das, was schon oben über Warmfront und Fallgebiet gesagt wurde.

Die Untersuchungen werden an den Kältewellen in Rußland durchgeführt werden. Einerseits sollen sie eine Ergänzung zu den Fickerschen Arbeiten über Kältewellen in Rußland[4] [5] bilden, andererseits ist Rußland für Untersuchungen, die mit der Ausbreitung kalter Luft zusammenhängen, am geeignetsten. Größere Wasserflächen und hohe Gebirge, die eine derartige Untersuchung im westlichen Europa infolge ihrer modifizierenden Wirkung auf die Temperatur und Strömung außerordentlich erschweren, fehlen in Rußland. Es fehlt aber auch das starke meridionale Temperaturgefälle, das Amerika zum Beispiel auszeichnet. Infolgedessen sind die Vorgänge in Rußland nicht so sehr von dem gegenseitigen Verhalten kalter und warmer Luft, als von der potentiellen Energie der Kaltluft selber abhängig. Auch dies wirkt vereinfachend auf den Ablauf von Temperatur und Luftdruck, die uns in dieser Arbeit ja hauptsächlich interessieren.

Es ist für uns von größter Wichtigkeit, bei der gewählten Untersuchungsmethode den meteorologisch und physikalisch einfachsten Vorgang unseren Untersuchungen zu Grunde zu legen. Nach dem angeführten erhellt, daß wir diesen in den Steiggebieten der russischen Kältewellen vor uns haben, daß es also hier am ehesten möglich ist, aus den Verhältnissen an der Erdoberfläche auch im Einzelfalle ein sicheres Urteil über die Verhältnisse einer hochreichenden Luftmasse zu gewinnen.

Die Daten der Kältewellen sind der erwähnten Arbeit von Ficker über die Ausbreitung kalter Luft in Rußland entnommen. Insgesamt wurden 32 Wellen aus den Jahren 1898—1902 einer näheren Betrachtung unterzogen, und zwar nur die, deren Bahnen und Besonderheiten in der erwähnten Arbeit länger oder kürzer beschrieben wurden. Die Isochronen selbst mußten für diese Arbeit neu gezeichnet werden. Dabei wurde dieselbe Methode benutzt, die Ficker bereits angewandt hat. Der Vorderrand der Kaltluft wurde nicht mit Hilfe der synoptischen Karten konstruiert, sondern aus den Terminbeobachtungen der einzelnen Stationen wurde das Datum eines Kälteeinbruches ermittelt, dies dann kartographisch dargestellt und die Orte verbunden, an denen die Kältewelle bereits am Morgentermin eines und desselben Tages vorhanden war. Es wurde auch versucht, die Front der Kälte nach den synoptischen Karten zu zeichnen. Jedoch kam man bald wieder auf die erste Methode zurück. Es ergab sich nämlich, daß sich die Zeit des Kälteeinbruches an einer Station viel genauer festlegen ließ, als die Lage des vorderen Randes der Kaltluft auf dem synoptischen Kartenbild. Dies ist im wesentlichen dadurch bedingt, daß wir beim Zurückgreifen auf die Extensobeobachtungen neben den Absolutwerten der meteorologischen Elemente auch deren Differenzen leicht bilden können, und daß uns die Daten einer größeren Anzahl von Elementen zur Verfügung stehen. Neben Temperatur und Wind wurde zur Ermittlung der Einbruchszeit vor allem die absolute Feuchtigkeit benutzt.

Der Vergleich mit den Fickerschen Bemerkungen ließ erkennen, daß die zu dieser Arbeit neu gezeichneten Isochronen in jedem Falle die Ausbreitung der Kaltluft wie in der Fickerschen Arbeit darstellten.

Die benutzten meteorologischen Beobachtungen sind den Annalen des physikalischen Zentralobservatoriums Nikolas in Petersburg entnommen worden. Zur Orientierung über die vorkommenden Wetterlagen dienten die Hoffmeyerschen Karten vom Nordatlantischen Ozean sowie die russischen Wetterkarten. Die in dieser Arbeit verwendeten Isallobarenkarten beziehen sich auf ein Intervall von 24 Stunden. Sie sind aus den Morgenbeobachtungen errechnet worden. Dies Intervall und die Beobachtungen am Morgentermin sind auch, sofern nicht ausdrücklich etwas anderes bemerkt wird, der Differenzenbildung bei anderen meteorologischen Elementen zu Grunde gelegt worden. Die Datierung ist so vorgenommen worden, daß eine Isallobarenkarte unter dem Datum des letzten benutzten Tages angeführt wurde. Die Isallobarenkarte vom 18. März 1901 z. B. würde also die Differenzen der Barometerstände vom 18. morgens gegen den 17. morgens enthalten. Zur Zeichnung der Karten sind die Barometerablesungen an den folgenden Stationen benutzt worden:

Westlich des Urals: Kola, Kem, Archangelsk, Mesen, Kargopol, Wologda, Wiatka, Perm, Petersburg, Libau, Vlotslavsk, Wilna, Smolensk, Uspenskaja, Kursk, Elatma, Lugansk, Nikolaew, Totaikoi, Stavropol, Astrachan, Uralsk, Orenburg.

Östlich des Urals: Malye Karmakuly, Obdorsk, Bogoslovsk, Surgut, Jekaterinburg, Omsk, Tomsk, Barnaul, Belagatschkoe Zimovie, Kansk.

Zentralasien: Kasalinsk, Akmolinsk, Wernyi, Taschkent, Samarkand, Aschabad.

Bergstationen: Gudaur im Kaukasus (2204 m), Pamirski-Post auf der Pamir-Hochsteppe (3640 m).

Infolge fehlender Beobachtungen konnte mit diesen Stationen nicht immer gearbeitet werden. Die Abweichungen werden kurz zusammengestellt:

1898: Als Ersatz für das fehlende Kola wurde Teriberka, als Ersatz für Kem wurde Solovetskii genommen. Die Ersatzstationen liegen sehr nahe bei den fehlenden Beobachtungsorten. Im August fehlten die Beobachtungen von Malye Karmakuly, während des ganzen Jahres die von Akmolinsk.

1899: Es fehlten die Beobachtungen von Akmolinsk.

1900: Es fehlten die Beobachtungen von Akmolinsk, außerdem im Dezember die von Malye Karmakuly und Pamirski-Post.

1901: Die Beobachtungen von Malye Karmakuly und Kasalinsk fehlten, ferner im Januar die von Pamirski-Post. Ferner fehlten die Beobachtungen von Kansk, als Ersatzstation wurde Krasnojarsk benutzt.

1902: Während des ganzen Jahres fehlten die Beobachtungen von Stavropol und Pamirski-Post. Als Ersatzstation für das ebenfalls fehlende Kansk wurde Krasnojarsk genommen.

Der Untersuchung wurde das Gebiet zwischen Jenissei und der Westgrenze des ehemaligen russischen Reiches zu Grunde gelegt. Auf die Benutzung der ostsibirischen Stationen wurde verzichtet, da dort zu wenig Stationen zu einer genügenden Festlegung der nord-südlichen Erstreckung der Isallobaren vorhanden sind.

Betrachtet man die große Ausdehnung des Gebietes, so möchte man glauben, es sei nicht möglich, mit 39 Stationen die Linien gleicher Änderung genügend sicher zu zeichnen. Dem ist folgendes zu erwidern: In Zentralasien und Westsibirien steht uns ein dichteres Netz von Beobachtungen überhaupt nicht zur Verfügung. Eine Verengerung des Netzes ist also nur im europäischen Rußland möglich. Bei einigen Kältewellen sind hier auch die Beobachtungen von weiteren Stationen benutzt worden. Es zeigte sich jedoch, daß sich die Isallobaren auch mit den oben angeführten 39 Stationen in befriedigender Weise zeichnen ließen. Es konnten also die Beobachtungen von nur 39 Stationen ohne Nachteil der Arbeit zu Grunde gelegt werden.

In die Isallobarenkarten wurden die Isochronen der Kältewellen eingezeichnet. Man konnte nun durch Vergleich zweier aufeinanderfolgender Karten bequem übersehen, welche Abweichungen zwischen dem Isallobarenverlauf und der Wanderung der Kältewelle vorhanden waren. Diese wurden an Hand der Einzelbeobachtungen näher untersucht. Ferner sind regelmäßig die im Kern und an den Rändern von Steiggebieten liegenden Stationen einer eingehenden Betrachtung unterzogen worden, deren wesentlichster Zweck war, aus dem Verlauf der Gesamtheit der meteorologischen Elemente die wahrscheinlichste Form der oberen Begrenzungsfläche der Kältewelle zu finden und mit dem beobachteten Druckgang zu vergleichen. Außerdem wurde ein besonderes Augenmerk auf die Fortpflanzung von Kältewelle und Steiggebiet gerichtet. Den hieraus gezogenen Schlüssen wurde ein in der Methode begründetes besonderes Gewicht beigelegt.

Es wurde bereits im Anfang erwähnt, daß die in dieser Arbeit benutzte Methode ein Hilfsmittel darstellt, also keine absolute Beweiskraft hat. Bedenkt man aber einerseits die Vorzüge des Materials für eine derartige Untersuchung, andererseits die zahlreichen Möglichkeiten, die aus den Beobachtungen der verschiedenen Stationen gezogenen Schlüsse miteinander zu vergleichen, wobei man auf die räumliche Verteilung und den zeitlichen Ablauf der Erscheinungen zurückgreifen kann, so wird man erwarten können, auch mit der hier in Anwendung gebrachten Methode zu einwandfreien Resultaten zu gelangen.

Die Arbeit zerfällt in drei Abschnitte, die sich an die Lebensgeschichte einer Kältewelle knüpfen. Wir behandeln:

I. Die Steiggebiete, die beim Erscheinen der Kältewelle,
II. die bei der Wanderung der Kältewelle durch Rußland, Zentralasien und Westsibirien, und
III. die beim Verschwinden der Kältewelle auftreten.

Bei der eingehenden Untersuchung des Materials wurde ersichtlich, daß der Verlauf der Kältewellen und Steiggebiete im ganzen nicht einheitlich genug war, um einen guten Einteilungsgrund abzugeben. Man kann dies auch der Fickerschen Arbeit entnehmen, in der eine Sonderung der Wellen nur nach den Windverhältnissen am Eismeer möglich war.

Bei der vorgenommenen Trennung nach Lebensabschnitten war es möglich, die verschiedenen Erscheinungen bei den Steiggebieten in wenigen Untergruppen genügend vollständig zu erfassen. Bei der Wahl der Untergruppen wurde nicht danach gestrebt, in allen drei Abschnitten ein einheitliches Prinzip zu Grunde zu legen, sondern die Gruppierung wurde immer dem vorliegenden Material angepaßt.

A) II. Zusammenstellung der in dieser Arbeit benutzten Ergebnisse bisheriger Untersuchungen über Kältewellen.

Da die russischen Kältewellen mit den sekundären Steiggebieten identisch sind, die wir aus den Isallobarenkarten eliminieren wollten, um den primären Bestandteil der Bodendruckänderung zu erhalten, ist eine Darstellung der über sie vorhandenen Beobachtungsergebnisse nötig. Hierfür kommen fast ausschließlich die Abhandlungen von Ficker in Betracht. Außerdem müssen wir kurz angeben, welche Formen wir für die obere Begrenzung der Kaltluftmassen in dieser Arbeit annehmen, da die horizontale Verteilung des Barometeranstiegs auch hiervon abhängig ist.

Die Einbruchstelle kalter Luft nach Rußland und Sibirien liegt zwischen dem 30. und 90. Meridian östlich von Greenwich. Nach den vorwiegenden Windrichtungen in diesem Gebiet bei Ankunft der kalten Luftmassen kann man zwei Arten von Kältewellen unterscheiden, einmal solche, die mit NW-Winden auftreten; sie erscheinen zuerst am Weißen Meer und an der Halbinsel Kola. Da diese Kaltluftmassen meist aus dem Raume bei Spitzbergen, vielleicht sogar vom nördlichsten Grönland stammen, müssen sie erst das warme Golfstromgebiet überschreiten, bevor sie auf dem Festlande zur Beobachtung kommen. Sie führen infolgedessen nicht die kälteste Luft nach dem Kontinent ein. Die tiefsten Temperaturen treten im hohen Norden Rußlands mit der zweiten Art von Kältewellen auf, die sich durch vorherrschende E- und NE-Winde in diesen Gebieten auszeichnet. Die kalte Luft stammt hier aus Gebieten, die im Osten von Nowaja Semlja liegen. Als Nährgebiet muß bei beiden Arten von Kältewellen das polare Kaltluftgebiet angesehen werden. Bei einer seltenen dritten Art liegt das Kaltluftreservoir bereits im Beobachtungsgebiet.

Die charakteristischen Züge der Ausbreitung kalter Luft sind am besten bei den Wellen zu erkennen, die zuerst mit NE- und E-Winden an der Eismeerküste auftreten. Die Fortpflanzungsrichtung dieser Wellen beschreibt einen nach Osten offenen Bogen. Am Eismeer müssen wir ein westliches Vordringen der kalten Luft annehmen. Auf dem Festlande geht es in der Hauptsache nach Süden. In Mittelrußland vollziehen die Kaltluftmassen eine Wendung nach Osten und brechen in Westsibirien mit W-Winden ein. Die Wellen dieser Art haben die größte Ausbreitung nach Westen und dringen zeitweise bis Mitteleuropa vor. Hinsichtlich Zentralasiens hat sich ergeben, daß im nördlichen Teil die kalte Luft aus Norden zufließt. Der südliche Teil erhält die kalte Luft aus Nordwesten vom europäischen Rußland, nachdem sie das Kaspische Meer überweht und dadurch ihre abkühlende Wirkung etwas eingebüßt hat. Eine ähnliche Fortpflanzungsrichtung müssen wir in diesen Gebieten natürlich auch von den thermisch-sekundär bedingten Steiggebieten erwarten.

Die Polarluftausbrüche, die an der europäischen Eismeerküste mit NW-Winden auftreten, sind hinsichtlich ihrer Ausbreitung den Kältewellen des ersten Typus ähnlich, jedoch fehlt der erste Teil, die Wanderung von Osten nach Westen und meist auch die Ausbreitung nach Süden. Es scheint, daß diese Wellen ihre Wendung nach Osten, wenn man überhaupt eine solche annehmen kann, bereits im hohen Norden außerhalb des Beobachtungsgebietes vollzogen haben. Diese Kältewellen ziehen durch Rußland in südöstlicher Richtung und dehnen sich selten nach dem mittleren Europa aus. In Westsibirien wandern sie ebenso wie die vom ersten Typus vorwiegend nach Osten. Ficker sagt, daß bei diesen Wellen gewissermaßen nur der linke Flügel der Kältewelle bei nach Westen verschobenem Ausgangsgebiet entwickelt ist.

Die Geschwindigkeit, mit der sich die Kältewellen verlagern, gleicht im großen und ganzen der von Gewitterzügen in Westeuropa. Sie ist auf der Westseite meist größer als auf der Ostseite. Da wir sie im Einzelfalle immer an den Isochronen verfolgen können, ist ihr Mittelwert für unseren Zweck nur von untergeordneter Bedeutung.

In der Regel ist der westliche, sich schneller bewegende Flügel einer Kältewelle wärmer als der östliche. Jedoch scheint es sich hier entweder nur um eine Erscheinung in den untersten Schichten zu handeln, oder die Kaltluft reicht auf dem westlichen, wärmeren Flügel sehr viel höher als auf dem

östlicheren, kälteren; denn die Drucksteigerung auf dem wärmeren Flügel ist nach Ficker meist ebenso groß oder größer als auf dem kälteren Flügel.

Über die vertikale Form und Erstreckung russischer Kältewellen liegen keine Arbeiten vor. Wir wollen im folgenden annehmen, daß sie in den wesentlichen Zügen dieselbe ist, wie die der in Europa schon sehr eingehend untersuchten Kälteeinbrüche. Hinter der Einbruchslinie wachsen die Kaltluftmassen hiernach allmählich an, zuerst stärker, dann schwächer. Wir nehmen an, daß dieses Anwachsen in der Regel über den Zeitraum von 24 Stunden hinausgeht, so daß wir mit diesem Zeitraum nur in Ausnahmefällen schon einen Teil des Druckfalles wieder einbeziehen, der durch das Seichterwerden der Kaltluft auf der Rückseite verursacht wird. Die große Ausdehnung der russischen Kältewellen läßt die Annahme als wahrscheinlich erscheinen.

Der Schnitt parallel zu den Isochronen soll nach unseren Annahmen im allgemeinen dem durch eine zähe, nach allen Seiten auseinanderfließende Flüssigkeit gleich sein. Nur in Fällen, wo sich die beobachteten Druckänderungen schwer mit diesem einfachsten Schema vergleichen lassen, wird zunächst angenommen, daß sich vielleicht eine Verdoppelung der Kältewelle unter dem Einfluß der konstanten Westwinde unserer Breiten (siehe Literaturangabe[2])[5]) eingestellt hat. Entsprechend der Entstehungsursache müssen hierbei die Wellen eine Bewegung von W nach E besitzen. Sie dürfen aber nur innerhalb der Polarluft auftreten. Erneuten Zufluß polarer Luft vermuten wir, wenn sich ein Steiggebiet aus nördlichen Richtungen bewegt. Die nähere Untersuchung wird jedoch in jedem Falle erst Aufschluß darüber geben müssen, wieweit diese Anschauungen im Einzelfalle als berechtigt anzusehen sind.

Die Luftdruckverhältnisse sind bisher bei den russischen Kältewellen als sehr einfach angenommen worden. In rohen Zügen sind sie es auch. Man findet den tiefsten Druck kurz vor dem Einbruch der Kaltluft. Die Kältewelle selbst ist meist die Rückseite einer Depression. Sie bringt Druckanstieg. Aus der Beobachtung des Luftdruckganges bei den Kältewellen des Kaspischen Meeres hat jedoch F. Gölles[6]) bereits geschlossen, daß die Luftdruckverhältnisse bei den russischen Kältewellen oft recht kompliziert sein können. Er zeigte, daß in diesem Gebiet der Luftdruckgang befriedigend nur durch zwei Komponenten dargestellt werden kann. Die eine ist durch den Kälteeinbruch bedingt, die andere stammt wahrscheinlich aus den höheren Atmosphärenschichten. H. Ficker[3]) hat aus dem Vergleich von interdiurner Druck- und Temperaturänderung gefunden, daß die Druckänderungen im Norden von Rußland viel weniger häufig mit den entgegengesetzten Temperaturänderungen verknüpft sind als in Mittel- und Südrußland. Auch dieses spricht dafür, daß bei den russischen Kältewellen noch andere Vorgänge beteiligt sind, die das Zustandekommen der Bodendruckänderung bedingen.

Wir wollen uns nun unserem Thema zuwenden und an Hand von Beispielen untersuchen, wie weit uns die Betrachtung der Steiggebiete bei den Kaltlufteinbrüchen Rußlands in der Erkenntnis der unperiodischen Druckschwankungen fördern kann.

B) I. Die Steiggebiete beim Auftreten der Kältewelle.

Wäre das Steigen des Barometers bei den russischen Kältewellen lediglich durch das Gewicht der herangeströmten Kaltluft bedingt, so müßte man erwarten, daß die Steiggebiete im wesentlichen die Bahnen verfolgen, die uns von den Kältewellen her bekannt sind. Beschränken wir uns zunächst auf ihr Auftreten im Kartengebiet, so müssen wir also erwarten, daß die weitaus meisten im Raume zwischen Kola und Nowaja Semlja erscheinen. Entsteht dagegen ein Kälteausbruch erst innerhalb des Kartengebietes, so müssen wir hier das Entstehen eines Steiggebietes gewissermaßen aus dem Nichts heraus beobachten.

a) Die Kältewelle entstand im Beobachtungsgebiet.

(Typus a bei Ficker.)

Bei diesen, allerdings recht seltenen Fällen, fließt aus einem Kaltluftreservoir, dessen Begrenzung sich durch Beobachtung festlegen läßt, aus irgend welchen, uns zunächst noch nicht näher bekannten Ursachen kalte Luft und breitet sich mit den charakteristischen Merkmalen einer Kältewelle nach entfernten Gegenden hin aus. Dieser Fall läßt gewissermaßen den vollständigen Verlauf eines Polarluftausbruches erkennen, da man auch die Vorgänge innerhalb des Nährgebietes aus den Beob-

achtungen entnehmen kann. Dies ist bei den am Eismeer auftretenden Wellen nicht möglich. Ihr Nährgebiet ist unseren Beobachtungen verschlossen. Da zudem die Verhältnisse am Weißen Meer und nördlich davon durch den Golfstrom stark beeinflußt werden und man von dieser Seite her gegen die Beweiskraft der Beobachtungen etwas einwenden könnte, so ist es ohne weiteres zweckmäßig, die Verhältnisse an der Eismeerküste erst in zweiter Linie zu behandeln.

17. bis 20. Februar 1899 (Karte 1—4). Am 17. morgens waren die Luftdruckunterschiede über Rußland sehr gering. Im Nordosten lag ein schwaches Hochdruckgebiet, am Südende des Urals und zwischen Wolga und Dnjepr lagerte tiefer Druck, von schwachen Winden umgeben und vom übrigen Gebiet durch die Isobare von 760 mm abgetrennt. Die Temperaturunterschiede waren erheblich größer als die Druckunterschiede. Das Hoch im Nordosten und das Tief im Süden des Urals waren von extrem kalter Luft angefüllt. In dem zweiten, westlich der Wolga liegenden Tief fanden sich in der Osthälfte Frosttemperaturen, in der Westhälfte Temperaturen von 0—3°. In Polen und dem Baltikum lagen die Temperaturen teils etwas über, teils etwas unter Null. Die Temperaturen hatten sich gegen den 16. nur wenig geändert.

Die Karte der Barometeränderung vom 16. zum 17. (s. Anhang, Karte 1) zeigt ein Fallgebiet von etwa 7 mm in Westsibirien und eins von 9 mm zwischen dem Kaspischen und Schwarzen Meer. In Westrußland von Polen bis zur Halbinsel Kola war das Barometer ziemlich gleichmäßig 5—7 mm gestiegen. Am Weißen Meer war mit dem Steiggebiet Temperaturfall verbunden, an der Ostsee trat keine wesentliche Temperaturänderung ein (Libau $\Delta p = +7.0$ mm, $\Delta T = +0.1°$). In Nordrußland, in dem Gebiet, das zwischen Wolga im Süden, Ural im Osten und Eismeerküste im Norden liegt, hatte eine Drucksteigerung um 1—2 mm stattgefunden.

Auf der folgenden Isallobarenkarte (17./18., Karte 2) war das ganze europäische Rußland von einem Steiggebiet, das allerdings nicht sehr intensiv war, überdeckt. Fallgebiete lagen am Schwarzen Meer und am Aralsee. Die am Vortage in Nord- und Ostrußland lagernde Kaltluft hatte sich wahrscheinlich unter dem Einflusse des von Westen gekommenen Steiggebietes in Bewegung gesetzt und war nach Westen und Süden geströmt. Ihre Front fiel jedoch mit Ausnahme des östlichsten Flügels nicht mit der Grenze zwischen Steig- und Fallgebiet zusammen, sondern lag mitten in dem Steiggebiet. Das Eigentümlichste aber war, daß der stärkste Barometeranstieg in West- und Nordwestrußland eintrat, wo die kalte Luft überhaupt nicht hingelangt war.

Wir wollen die in den verschiedenen Teilen des Steiggebietes eingetretenen Änderungen der meteorologischen Elemente einer kurzen Untersuchung unterziehen.

Es bedeutet im folgenden T die Temperatur in Celsiusgraden, p den Luftdruck in Millimetern, e den Dampfdruck in Millimetern, ΔT, Δp oder Δe die entsprechenden Änderungen innerhalb von 24 Stunden. Die Daten beziehen sich, falls nicht ausdrücklich etwas anderes angegeben, immer auf die 7^h-Morgenbeobachtung; die Windgeschwindigkeit ist in m/sec angegeben.

Eismeer und Nordrußland.

	T 18.	ΔT 17./18.	Δp 17./18.	e 18.	Δe 17./18.	Wind 17.	Wind 18.	Bewölkg. 18.
Kola	—23.2	+ 4.1	+5.7	0.6	+0.2	SW 4	SW 1	0
Kem	—20.7	—11.1	+8.0	0.7	—1.2	C	W 2	1
Archangelsk	—10.4	+ 0.5	+6.2	1.9	+0.2	ESE 3	SE 3	10
Mesen	—13.7	+ 3.9	+5.3	1.4	+0.3	SSE 3	SSE 3	10
Kargopol	— 9.8	— 2.2	+6.2	1.8	—0.4	ESE 1	ESE 2	10

Der Druckanstieg in diesem Gebiet war recht gleichmäßig, die Temperaturen waren zwar ziemlich tief, zeigten aber im allgemeinen die Tendenz, anzusteigen. Die Winde wehten aus südlichen Richtungen. Man hat den Eindruck, daß in diesem Gebiete kalte Luft langsam nach Norden zurückströmte. Auffallend ist, daß der Druck in Kem trotz kräftiger Abkühlung nur wenig mehr gestiegen ist als in den anderen Stationen, die größtenteils leichte Erwärmung und steigenden Dampfdruck aufweisen. Der Temperaturfall in Kem wird teils als Advektion kalter Luft aus dem Hinterlande, teils als Ausstrahlungseffekt zu erklären sein, wofür die W-Winde und die geringe Bewölkung sprechen. Man wird bei Kem nicht den gesamten Druckanstieg auf die Wirkung des lokalen Kälteeinbruches zurückführen müssen, sondern lediglich die Differenz gegen die anderen Stationen, also 2—3 mm. Daraus ergibt sich, daß die Abkühlung hier nur in einer seichten Bodenschicht vor sich gegangen sein kann.

Der die Drucksteigerung in diesem Gebiete verursachende Vorgang läßt sich nicht mit Sicherheit angeben. Im wesentlichen kann er auf zwei Ursachen beruhen, entweder wurde die Kaltluftmasse in diesem Gebiet höher, es trat also in der mittleren Troposphäre Abkühlung ein, oder die drucksteigernde Wirkung ging von Vorgängen aus, die nicht in der Troposphäre ihren Sitz gehabt haben. Eigentlich sollte man Druckfall erwarten, denn die kalte Luft, die den Norden und Osten von Rußland einnahm, begann sich nach Süden auszubreiten. Infolgedessen müßten die Kaltluftmassen im Norden seichter werden. Die Südwinde an der Eismeerküste sprechen dafür, daß ein Luftersatz vom Eismeer nicht eintrat.

West- und Mittelrußland.

	T 18.	ΔT. 17./18.	Δp 17./18.	e 18.	Δe 17./18.	Wind 17.	Wind 18.	Bewölkg. 18.
Vlotslavsk	2.2	—1.3	+6.8	5.3	—0.2	ESE 3	C	10
Wilna	0.2	0.0	+5.4	4.5	—0.1	N 4	N 2	10
Petersburg	— 4.0	—1.8	+6.6	3.1	—0.5	NW 2	NNW 2	10
Smolensk	— 2.3	—2.3	+8.1	3.2	—1.3	C	NE 2	10
Wologda	—13.2	—4.8	+6.2	1.4	—0.6	ESE 2	NNE 1	10
Uspenskaja	—13.3	—5.3	+5.4	1.3	—0.9	SE 4	ENE 5	10
Kursk	— 4.1	—1.2	+3.9	3.3	—0.3	E 3	NE 5	10

Die westlichsten dieser Stationen weisen keine Merkmale auf, die den Ersatz wärmerer Luft durch kältere vermuten lassen. Temperatur und Dampfdruck waren verhältnismäßig hoch und erfuhren vom 17. zum 18. Februar keine wesentliche Änderung. Anzeichen für die Advektion kalter Luft bestanden in dem etwas kälteren Petersburg ebenfalls nicht in bedeutendem Maße, wenigstens scheint vom 17. zum 18. keine Front über Petersburg hinweggegangen zu sein. Smolensk, Wologda, Uspenskaja und in geringem Maße auch Kursk zeigen dagegen Abkühlung mit charakteristischem Windsprung auf NE. In diesen Gebieten ist der Kälteeinbruch erfolgt, aber augenscheinlich sind hier zu unterscheiden 1. das innere Gebiet (Wologda, Uspenskaja), in dem von NE bereits extrem kalte und trockene Luft zugeflossen ist, und 2. das Randgebiet (Smolensk im Westen, Kursk im Süden), in dem zwar auch eine Winddrehung nach NE eingetreten, aber noch nicht die Luft aus dem Herdgebiet der Kältewelle zugeflossen ist, sondern lediglich Luft aus den nordöstlich von diesen Stationen gelegenen, kälteren Gebieten.

Die Druckänderungen sind ungefähr so groß wie bei den Stationen an der Eismeerküste und zeigen auch wie diese unter sich keine große Verschiedenheit. Dies ist um so eigentümlicher, als wir es in einem Teil dieses Gebiets mit dem Beginn einer Kältewelle zu tun haben. Es trat bei zwei Stationen kräftige, wegen der hohen Bewölkung nicht durch Ausstrahlung — wie bei Kem — entstandene Abkühlung ein, die Drucksteigerung war in diesen beiden Stationen aber kleiner als in den westlich gelegenen, die keine oder nur eine geringe Abkühlung zu verzeichnen hatten. Der größte Barometeranstieg trat in dem westlichen Randgebiet der Kaltluft ein. Würde man nur diesen erklären wollen, so könnte man annehmen, die drucksteigernde Wirkung der Kaltluft sei hier am größten, da die Advektion kalter Luft am 17. begonnen hatte und infolgedessen die Kaltluft vom Einbruch bis zu der Beobachtung am 18. anhaltend höher geworden sei, während in Uspenskaja und Wologda die obere Begrenzung der Kaltluft bereits wieder sinke und die dadurch eintretende Erwärmung in der mittleren Troposhäre die starke Abkühlung in den untersten Schichten hinsichtlich ihrer Wirkung auf den Barometergang etwas abschwäche. Abgesehen davon, daß Smolensk noch garnicht im Bereich der Polarluft liegt, wäre auch nicht einzusehen, warum dieselbe drucksteigernde Wirkung sich nicht auch in Kursk bemerkbar gemacht hätte. Nimmt man hinzu, daß in Polen und Westrußland die gleiche Drucksteigerung wie im mittleren Rußland, aber ohne wesentliche Temperaturänderungen eingetreten war, so erscheint es am wahrscheinlichsten, daß das Steiggebiet in Rußland durch die Superposition zweier Steiggebiete entstanden ist, nämlich eines mit der Kältewelle zusammenhängenden, thermisch-sekundär bedingten und eines zweiten, aus dem Temperaturgang und der Luftversetzung in den unteren Schichten der Atmosphäre nicht erklärbaren Steiggebietes. Der Druckanstieg in Smolensk würde sich durch die Superposition beider erklären lassen.

Die nächste Tabelle enthält drei Stationsgruppen. Orenburg und Uralsk gehören dem Nährgebiet an, Astrachan vertritt das Gebiet, in das die Kaltluft vom 17. bis 18. einströmte, Stavropol und Gudaur liegen außerhalb des Bereiches der Kaltluft. Die Drucksteigung war in den bereits von der Kaltluft überflossenen Gebieten größer als in Stavropol, ein Effekt der Kältewelle. Gudaur (2204 m hoch) zeigt etwas Druckanstieg bei Erwärmung, was auf Ursachen in höheren Schichten schließen läßt.

Allerdings ist dann eigentümlich, daß der Druckanstieg in Astrachan so gering war, da doch eine superponierte Wirkung als sehr wahrscheinlich erscheint. Es ist aber auch denkbar, und gerade die verhältnismäßig geringe Drucksteigerung am Nordende des Kaspischen Meeres spricht dafür, daß man zwar in Gudaur und eventuell auch in Stavropol ein geringes, durch Vorgänge in größeren Höhen bedingtes Steigen des Barometers beobachtete, daß dies aber zwischen Gudaur und dem Kaspischen Meer verschwand oder sogar in ein hohes Fallgebiet überging. Aus der relativ geringen Drucksteigerung an den verschiedenen Stationen scheint hervorzugehen, daß die in Mittel- und Südrußland in Bewegung geratene Kaltluft ziemlich seicht war.

Ost- und Südostrußland.

	T 18.	ΔT 17./18.	Δp 17./18.	e 18.	Δe 17./18.	Wind 17.	Wind 18.	Bewölkg. 18.
Orenburg	−27.5	− 1.7	+6.0	—	—	N 3	NE 1	10
Uralsk	−25.8	− 1.6	+3.3	0.4	−0.1	NNW 2	NNW 2	0
Astrachan	−16.1	−11.5	+4.2	1.1	−2.0	E 4	ENE 4	0
Stavropol	0.2	− 2.5	+2.5	4.7	+0.6	WNW 9	C	10
Gudaur (2204 m)	− 8.3	+ 0.8	+0.5	2.0	0.0	ENE 3	C	10

Fassen wir kurz die Ergebnisse unserer Analyse zusammen. Wir fanden, daß in einem ziemlich einheitlichen und auch hinsichtlich seiner Intensität wenig gegliederten Steiggebiet verschiedenartige meteorologische Vorgänge zu beobachten waren, ohne daß der Betrag der Drucksteigerung einen ähnlichen Unterschied aufwies. Die Drucksteigerung reichte besonders im Westen gleichmäßig über ein Gebiet mit Kälteeinbruch in ein Gebiet mit unveränderten Temperaturen, so daß es wahrscheinlich erschien, daß hier zwei verschiedenartige meteorologische Vorgänge am Zustandekommen der Druckänderungen beteiligt waren. Zwischen dem Kaspischen und dem Schwarzen Meer lagen die Verhältnisse nicht klar. Wahrscheinlich trat im Gebiete des Kaukasus auch hier ein geringes primäres Steigen auf, das jedoch mit dem in Westrußland gefundenen Steigen nicht zusammenhing, sondern durch ein Fallgebiet getrennt war. Dies Barometerfallgebiet, das am 18. über dem Schwarzen Meer lag, hat in Gudaur bei seinem Vorbeigang beträchtlichen Druckfall hervorgerufen.

In der Isallobarenkarte vom 18. zum 19. (Karte 3) zeigt sich eine Zweiteilung des Steiggebietes. Ein Kern liegt im südwestlichen und westlichen Rußland, der zweite in Zentralasien am Aralsee.

Das Steiggebiet in Zentralasien ist durch sehr wenig Stationen festgelegt. In Kasalinsk war ein Kälteeinbruch erfolgt ($\Delta p = +10.4$ mm, $\Delta T = -25.2^0$). In den Stationen, die am Rande der zentralasiatischen Gebirge liegen, war eine Kältewelle dagegen nicht zu konstatieren (z. B. Taschkent: $\Delta p = +2.2$ mm, $\Delta T = +4.6^0$).

Westliches Steiggebiet.

	T 19.	ΔT 18./19.	Δp 18./19.	e 19.	Δe 18./19.	Wind 18.	Wind 19.	Bewölkg. 19.
Nikolaew	− 0.9	− 3.0	+6.6	3.6	−1.5	NNW 14	NNE 12	10
Lugansk	− 7.8	− 4.6	+5.2	2.1	−1.2	ENE 5	ENE 7	10
Smolensk	− 6.8	− 4.5	+7.9	2.4	−0.8	NE 2	NE 3	10
Elatma	−24.3	− 6.8	+7.6	0.5	−0.5	C	NE 2	0
Wologda	−25.6	−12.4	+5.4	0.5	−0.9	C	NNE	0

In Nikolaew war die extrem kalte Luft noch nicht angelangt. Dies geht aus dem hohen Dampfdruck hervor. In Elatma und Wologda war die kräftigste Abkühlung eingetreten, aber der Druck war nicht mehr als in den anderen Stationen gestiegen. Dies und die geringe Bewölkung am 19. deutet darauf hin, daß die Abkühlung in diesen beiden Stationen zum größten Teil ein Effekt der Ausstrahlung war, infolgedessen also zu der Drucksteigerung nur wenig beitrug. In den westlichsten Stationen des russischen Reiches erreichte der Luftdruck am 19. Februar seine größte Höhe und ging dann zum Fallen über.

Der östliche und westliche Kern des Steiggebietes sind durch ein Zwischengebiet verbunden, in dem wir etwa 4 mm Druckanstieg finden, also die Hälfte der in den Kernen eingetretenen Drucksteigerung. Die Abkühlung betrug etwa $1^1/_2$—2^0. Es läßt sich nicht angeben, durch welche Vorgänge der Barometeranstieg verursacht wurde, da die hier eingetretene Abkühlung auch ein Effekt der Aus-

strahlung gewesen sein kann. Für das letztere würde sprechen, daß in den Beobachtungen entweder starke Bewölkung bei Windstille oder schwacher Wind bei heiterem Wetter angegeben wurde.

Sehen wir von dem geringen Druckanstieg in den zentralasiatischen Randgebirgen ab, so erhalten wir das Resultat, daß uns die Analyse des Steiggebietes vom 18./19. keine Ergebnisse lieferte, die zu der Annahme von drucksteigernden Vorgängen in den höheren Schichten der Atmosphäre zwingen würden. Die Zweiteilung des Steiggebietes, die gleichzeitig mit einer Teilung der Kältewelle vor sich ging, läßt es wahrscheinlicher erscheinen, daß das Steiggebiet lediglich troposphärischer Herkunft war.

Die letzte Karte (Karte 4), die wir bei dieser Kältewelle näher diskutieren wollen, zeigt in Abweichung von der vorhergehenden drei Steiggebiete.

Der westliche Kern, der sich am Schwarzen Meer befindet, war durch die Advektion kalter Luft bedingt. Wir finden in Totaikoi, an der Südspitze der Krim, einen Temperatursturz von 5.8°, an der Nordwestküste des Schwarzen Meeres war er etwas größer (Nikolaew —9.0°). An den Küsten wehten kräftige, zum Teil stürmische Nord- und Ostwinde. Auf dem Kamm des Kaukasus fiel das Barometer, die normale Erscheinung bei einem Kälteeinbruch, der die Höhenstation nicht erreichte. Das Steiggebiet am Schwarzen Meer ist zum größten Teil mit dem identisch, das am vorhergehenden Tage Mittel- und Westrußland bedeckte.

Ein zweites Steiggebiet, dessen troposphärische Bedingtheit unverkennbar ist, liegt in Westsibirien. Es ist sehr gering und höchstwahrscheinlich der Rest des Steigens, das wir am Vortage im nördlichen Zentralasien beobachten konnten. Daß ein Kälteeinbruch eingetreten war, läßt sich aus folgendem erkennen. In Barnaul herrschte am 19. mittags eine Temperatur von —5.0°. Die Mitteltemperatur betrug in diesem Monat —11.2°. Am Mittag des nächsten Tages (20.) herrschten —18.2°, während der Druck etwas gestiegen war und die Windstillen oder die Nordwinde von einem Westwind am Abend des 19. unterbrochen worden waren. Wie bereits in der Besprechung der Arbeit von Ficker über Kältewellen in Rußland bemerkt wurde, erscheinen die Kältewellen in Westsibirien am häufigsten mit Westwinden.

In der zweiten Station Westsibiriens, die zu diesem Steiggebiet gehört, in Belagatschkoe Zimovie, erfolgte der Kälteeinbruch am Nachmittag des 19. Februar mit NW-Winden. Die Kaltluftmasse, die mit dem Steiggebiet nach Osten zog, scheint nicht mehr mächtig gewesen zu sein. Der Einbruch kalter Luft am 19. war der Vorläufer einer kräftigeren Abkühlung am 21., auf die wir jedoch nicht näher eingehen wollen.

Das dritte Steiggebiet der Isallobarenkarte vom 20. Februar liegt am südlichen Ural. Es folgen von ihm einige Daten in der schon wiederholt angewandten Bezeichnungsweise.

	T	ΔT	Δp	e	Δe	Wind	Wind	Bewölkg.
	20.	19./20.	19./20.	20.	19./20.	19.	20.	20.
Perm	—23.4	—2.0	+3.0	0.6	—0.1	WSW 2	W 1	4
Jekaterinburg . . .	—23.4	—2.6	+4.8	0.6	—0.1	NNW 6	NNW 5	1
Orenburg	—27.4	+2.0	+3.1	(fehlt)	(fehlt)	C	SE 1	10
Uralsk	—24.5	+2.8	+2.4	0.4	0.0	NNE 3	NNE 3	2

Das Uralgebirge verursachte keine wesentlich veränderte Verhältnisse. In den nördlichen Stationen finden wir Abkühlung, in den südlichen Erwärmung. Die Temperaturänderungen sind gering und scheinen mit der Druckänderung nur einen losen Zusammenhang zu besitzen.

Das Auffallendste an diesem Steiggebiet ist nicht die begleitende Witterung, sondern sein Auftreten überhaupt; und gerade dieses legt den Gedanken nahe, daß wir es hier mit einer Erscheinung zu tun haben, die nicht unmittelbar mit der von uns verfolgten Kältewelle zusammenhängt. Dies wird klar, wenn wir uns die Erscheinungsformen des mit der Kältewelle in Zusammenhang stehenden Steiggebietes noch einmal kurz vergegenwärtigen.

Auf der ersten Isallobaren-Karte (16./17.) fand sich Druckanstieg in den westlichsten Stationen von Rußland, innerhalb eines Gebietes mit Temperaturen über Null. Dieses Steiggebiet war am 17./18. bis zum Ural gekommen und umfaßte ein kaltes Gebiet, das Nährgebiet der Kältewelle, und das verhältnismäßig warme westliche Rußland. Die teilweise auftretende Unabhängigkeit von den herrschenden Temperaturen und von den eingetretenen Temperaturänderungen legte den Gedanken nahe, daß wir zwei Steiggebiete vor uns hätten, von denen das eine nicht mit der Temperaturänderung in den boden-

nahen Schichten zusammenhing und von Westen herangewandert war, während das zweite durch Advektion und Höherwerden von extrem kalter Luft hervorgerufen und einfach im mittleren Rußland entstanden war. Die Isallobarenkarte vom 19. zeigte ein Gebiet, in dem die Druckänderungen von den Temperaturänderungen unabhängig waren, nicht mehr, sondern die eingetretene Zweiteilung des Steiggebietes schien mit der Teilung der betrachteten Kaltluftmasse in engem Zusammenhang zu stehen. Es hatte den Anschein, daß das Steigen in ganz Rußland und dem nördlichen Zentralasien durch Abkühlung in den unteren Schichten der Troposphäre hervorgerufen war. Man mußte nun erwarten, daß auch weiterhin entsprechend der Zweiteilung der Kältewelle zwei Kerne auftreten würden. In dem am 19. beide Steiggebiete verbindenden Gebiet wurde ein Druckanstieg gefunden, der vielleicht nicht durch Advektion kalter Luft hervorgerufen war. Und gerade in diesem Gebiet finden wir auch in der folgenden Isallobarenkarte Druckanstieg, der, ähnlich dem vom 17. zum 18., teils ein Gebiet mit Temperaturanstieg, teils ein solches mit Abkühlung umfaßte. Die an die Kältewellen geknüpften Zentren der Steiggebiete lagen weit auseinander und waren von dem dritten Kern durch leichten Barometerfall oder geringen Barometeranstieg gut abgeschieden. Es spricht sehr viel dafür, daß wir in dem Steiggebiet am Ural den Bestandteil des allgemeinen Steigens zu sehen haben, der unabhängig von den Verhältnissen in Rußland war und von Westen heranwanderte. Die ihn verursachenden Vorgänge müssen in Schichten zu suchen sein, die von dem troposphärischen Kälteeinbruch nicht beeinflußt wurden; denn sonst erscheint es rätselhaft, wie sich das Steiggebiet in der ganzen Zeit erhalten konnte.

Sehr auffällig ist, daß das Steigen vom 20. zum 21. Februar, dessen kartographische Darstellung wir jedoch nicht mehr bringen wollen, nur noch im westlichen Sibirien in kräftigem Maße vorhanden war, und zwar unter Begleiterscheinungen, die auf einen Kälteeinbruch schließen lassen. Der Kälteeinbruch war gerade in dem Gebiet erfolgt, in das das Steiggebiet vom vorhergehenden Tage, dessen niedrig-troposphärische Bedingtheit nicht angedeutet war, bei unveränderter Bahnrichtung und Geschwindigkeit am 21. ungefähr gelangt sein mußte. Die am 21. in Westsibirien erfolgte Advektion kalter Luft und die Lage des Steiggebietes hat eine gewisse Ähnlichkeit mit den Verhältnissen, die vorhanden waren, als sich die Kaltluft im westlichen und mittleren Rußland in Bewegung setzte. In beiden Fällen kam ein, von Temperaturänderungen am Boden ziemlich unabhängiges Steiggebiet von Westen. Der Kälteeinbruch begann, als das Steiggebiet in die Nähe der ruhenden Kaltluft kam. Es erscheint sehr wahrscheinlich, daß zwischen beiden Erscheinungen ein innerer Zusammenhang bestanden hat.

In dem behandelten Material sind noch einige Fälle enthalten, bei denen das Nährgebiet der Kältewelle innerhalb des Beobachtungsgebietes lag. Das Verhalten der Steiggebiete in diesen Fällen soll noch geschildert werden.

18. und 19. Oktober 1898. Sowohl Kältewelle wie Steiggebiet waren von dem ausführlich behandelten Beispiel stark verschieden. Die Auslösung der Kältewelle begann im westlichen Rußland. Das Steiggebiet konnte infolgedessen nicht vorher beobachtet werden, da unsere Isallobarenkarten ja mit dem westlichen Rußland abschließen. Auf die Heranwanderung eines unabhängig von der Kaltluft existierenden Steiggebietes deutet jedoch der Umstand, daß beim Erscheinen des Steiggebietes am 19. Oktober nur in dessen nördlichem Teil eine Kältewelle festgestellt werden konnte. In Polen z. B. trat wohl ein Barometeranstieg von 15 mm, aber nur ein Temperaturfall von 1—$1^1/_2$ Grad ein. In diesen, der Kältewelle vorgelagerten Teil des Steiggebietes drang die Kaltluft jedoch schnell von Norden ein, sodaß an den folgenden Tagen die Begrenzung der Kaltluft mit der Begrenzung des Barometeranstiegs zusammenfiel. Die Kältewelle wanderte ungewöhnlich rasch nach Osten.

2. bis 4. Januar 1901. Am Südende des Urals und in Westsibirien lagerte am 2. Januar 1901 kalte Luft, gleichzeitig fiel in diesem Gebiet das Barometer um 10 bis 15 mm. Im mittleren Rußland lag ein Steiggebiet des Luftdruckes von maximal 13 mm. Im südlichen Teil dieses Steiggebietes war ein Kälteeinbruch, im nördlichen Teil des Steiggebietes geringe Erwärmung oder nur sehr schwache Temperaturabnahme vorhanden. Am 3. Januar hatte sich die in Westsibirien lagernde kalte Luft in Bewegung gesetzt. Vom 2. zum 3. wie auch vom 3. zum 4. beobachtete man ein maximales Steigen von ungefähr 25 mm, also doppelt so viel als vom 1. zum 2. Januar, als mit dem nördlichen Teil des Steiggebietes noch keine Kältewelle verbunden war. Die Verdoppelung der Intensität legt die Annahme nahe, daß in Westsibirien die Superposition zweier Steiggebiete eingetreten war, von denen das eine

mit dem Kälteeinbruch in den unteren Luftschichten zusammenhing, während die Vorgänge, die das andere, von Westen kommende Steiggebiet hervorriefen, in höheren Schichten gesucht werden müssen, da sonst eine Superposition schlecht denkbar ist.

7. und 8. Januar 1901. Dieser Fall ist dadurch interessant, daß hier die Auslösung der Kältewelle unter dem Einfluß eines vom Weißen Meer gekommenen Systems von Isallobaren, d. h. einer Einheit von Fall- und Steiggebiet, vor sich gegangen war. Das Steiggebiet lag in der Isallobarenkarte vom 6. zum 7. Januar bei der Halbinsel Kola. Ein Kälteeinbruch in seinem Gefolge war nicht vorhanden. Der Kern des ungewöhnlich tiefen Barometerfalles, der ihm vorausging, lag am Ural (Perm —30.2 mm). Die Kältewelle folgte unmittelbar dem tiefsten Drucke. Ob die Auslösung des Kälteeinbruches im östlichen Rußland und westlichen Sibirien eine Folge des tiefen Falles oder des nachfolgenden Steigens war, läßt sich nicht angeben; da aber weder das Fallgebiet noch das Steiggebiet in Rußland entstanden, sondern von Norden (Fallgebiet) oder Nordwesten (Steiggebiet) herangewandert waren, und da die Auslösung der Kältewelle gerade bei Vorüberzug des Systems, beziehungsweise bei der Ankunft des Steiggebietes vor sich ging, war diese durch die Druckschwankung bedingt worden, nicht die Druckschwankung durch den Kälteeinbruch.

21. bis 22. Januar 1902. Die Kältewelle begann wie beim zweiten Beispiel in Westrußland. Das Steiggebiet konnte also nicht losgelöst von der Kältewelle beobachtet werden. An den vorhergehenden Tagen zeigte die Anordnung der Isallobaren eine wellenförmige Aufeinanderfolge von Steig- und Fallgebieten. Das Steiggebiet der Kältewelle schien zunächst auch nur ein Glied dieser Wellentätigkeit zu sein. Es war kein Grund zu der Annahme vorhanden, daß es abweichend von seinen Vorgängern nicht von Westen herangewandert, sondern in Westrußland entstanden war. Auf der Isallobarenkarte vom 20. zum 21. lag zwischen dem Weißen und dem Schwarzen Meer ein kräftiges Fallgebiet (maximal —25.1 mm). Ungefähr dasselbe Gebiet wurde auf der folgenden Karte von einem Steiggebiet überdeckt. Die Nordhälfte dieses Steiggebietes wurde von der Kältewelle ausgefüllt. Petersburg hatte bei NW- und NNW-Winden einen Temperaturfall von 11.3°, eine Drucksteigerung von 22.3 mm. In Polen war dagegen Abkühlung durch Advektion noch nicht vorhanden. Die Abkühlung in Vlotslavsk betrug z. B. nur 1.8° und scheint größtenteils durch Ausstrahlung bedingt gewesen zu sein. Die Drucksteigerung vom 21. zum 22. war hier jedoch immer noch 7.9 mm groß.

Die behandelten Fälle zeigen, daß man bei den allerdings recht seltenen Kältewellen, deren Herdgebiet im Beobachtungsgebiet lag, beim Beginn des Kälteeinbruches eine Superposition von zwei verschiedenartigen Steiggebieten fand. Durch die Advektion kalter Luft an der Erdoberfläche war nur eins von ihnen bedingt. Das andere wies geringen Zusammenhang mit dem Verlauf der Temperatur auf und war meist in Gebieten zu finden, die im Westen und Süden der Kältewelle lagen. In einigen Fällen, in denen es die Lage des Nährgebietes ermöglichte, konnte gezeigt werden, daß westlich oder nordwestlich dieses Gebietes bereits am Vortage ein Steiggebiet zu finden war, das mit sehr geringer Abkühlung oder sogar mit Erwärmung der untersten Luftschichten verbunden auftrat. Extrapolierte man seine Zugrichtung, so ergab sich, daß sich die kalte Luft ungefähr dann in Bewegung setzte, wenn dieses Steiggebiet an ihr vorbeizog. Der Kälteeinbruch war meist sofort in der nördlichen Hälfte des Steiggebietes nachzuweisen, während er in die Südhälfte erst später gelangte. In dem ausführlich behandelten ersten Beispiel ließ sich zeigen, daß das einheitliche Steiggebiet einer Kältewelle durch divergierende Zugrichtung ihres östlichen und westlichen Flügels nicht in zwei, sondern in drei Teile zerfiel. Der dritte, von der Kältewelle wahrscheinlich unabhängige Teil vermochte bei passender Lage eines kalten Gebietes in derselben Weise einen Kälteeinbruch auszulösen, wie ein von Westen herangewandertes Steiggebiet dies bei dem Hauptkälteeinbruch getan hatte. Es wurde vermutet, daß wir einmal zwei Arten von Steiggebieten zu unterscheiden haben, und zum zweiten, daß eine Kältewelle wahrscheinlich erst dann nach Süden vorstößt, wenn ihr durch die Druckänderung hierzu die geeigneten Vorbedingungen geschaffen waren.

Wir wollen nun untersuchen, wie weit sich die Verhältnisse bei den Kältewellen, deren Herdgebiet unserer Beobachtung nicht zugänglich ist, mit den eben gewonnenen Anschauungen vereinbaren lassen, und welche Modifikationen zur vollständigen Erklärung der Erscheinungen beim Auftreten einer Kältewelle noch nötig sind.

b) Die Kältewelle erschien am Eismeer mit Ostwinden.

(Typus b bei Ficker.)

Die Mehrzahl der russischen Kältewellen erscheint an der russischen Eismeerküste, und bei ihnen ist das Nährgebiet nicht der Beobachtung zugänglich. Nach Ficker haben wir bei diesen Wellen zwei Arten zu unterscheiden, je nachdem die Kaltluft von Nordwesten oder von Osten zufließt. Wir behandeln zuerst die letzte Art von Kältewellen. Nach den Erfahrungen des vorhergehenden Kapitels ist es wahrscheinlich oder möglich, daß auch am Eismeer die Steiggebiete zuerst im Westen auftreten. Käme die Kältewelle nun auch von Westen bzw. Nordwesten, so wäre es immerhin möglich, daß eine Trennung in zwei Steiggebiete nicht mehr vorgenommen werden kann, obwohl diese an und für sich vorhanden sind, da die Advektion kalter Luft den Druckverlauf dem Vorzeichen nach schon beherrscht. Bei den von Osten kommenden Wellen würden wir jedoch eine Gegeneinanderbewegung von Welle und Steiggebiet erhalten. Sollte aber die Advektion kalter Luft, entgegen den bisherigen Erfahrungen, allein den Druckgang beherrschen, so muß das Steiggebiet des Barometers ebenfalls von Osten oder eventuell auch von Norden kommen.

10. bis 13. Mai 1899 (Karte 5—8). Die Kälte trat im Beobachtungsgebiet zuerst am 10. Mai (Karte 5) bei Nowaja Semlja auf. Kola und Malye Karmakuly auf Nowaja Semlja hatten Druckanstieg. In demselben Gebiet war das Barometer zum Vortage sehr stark gefallen.

In Malye Karmakuly herrschte am 9. und 10. nachmittags und abends Nord- und Nordnordoststurm; man kann ihn mit der Advektion kalter Luft in Zusammenhang bringen. Das Steiggebiet war auf der vorhergehenden Isallobarenkarte nicht zu erkennen, so daß man annehmen muß, es war an Ort und Stelle durch die Advektion kalter Luft entstanden.

Am nächsten Tage (Karte 6) wiesen alle Stationen im Umkreis der Eismeerküste, teilweise auch Stationen am mittleren Ural einen Barometeranstieg gegenüber dem 10. Mai auf.

Beobachtungen im Steiggebiet.

	T 11.	ΔT 10./11.	Δp 10./11.	e 11.	Δe 10./11.	Wind 10.	Wind 11.	Bewölkg. 11.
Kola	0.0	+0.7	+4.0	3.0	+0.2	NW 8	C	10
Kem	0.6	—3.0	+2.8	3.3	—0.9	NW 5	NE 4	10
Archangelsk	— 0.9	—2.3	+7.9	2.3	—2.3	NW 7	NW 3	9
Wiatka	4.1	—4.0	+4.5	4.0	—2.0	W 5	C	7
Perm	1.2	—6.3	+5.3	2.9	—2.6	W 4	W 2	1
Malye Karmakuly . .	—12.5	+0.5	+8.0	—	—	C	N 12	10

Die Temperaturen lagen am 11. noch ziemlich hoch, so daß man aus ihnen nicht schließen kann, daß die von Osten kommende kalte Polarluft bereits bis zum Weißen Meer gedrungen ist. Die Winde sprechen auch dagegen. Der Dampfdruck war nur im Gebiete östlich des Weißen Meeres beträchtlich gesunken. Bedenkt man weiterhin, daß die vorherrschende Windrichtung auf Nowaja Semlja am 11. Mai Nord war, so hat man den Eindruck, daß die Hauptmasse der sehr kalten Luft zunächst direkt nach Süden geströmt war. Sie fand hier die Stelle, die ihrem Vordringen den geringsten Widerstand entgegensetzte. Auf der Isallobarenkarte vom 10. Mai (Karte 5) erkennt man, daß hier das Barometer viel weniger gefallen war, als östlich und westlich des Urals. Wir können also am oberen Ural ein relatives Steiggebiet annehmen, das nach den Erfahrungen des vorhergehenden Kapitels den Vorstoß kalter Luft nach Süden erheblich begünstigt. Die extrem niedrigen Temperaturen der von Osten kommenden Polarluft, die man aus dem Vergleich der am 11. am Eismeer und der am 13. Mai (siehe die betreffende Tabelle) z. B. in Kargopol beobachteten Temperaturen deutlich erkennt, und ihre vermutlich größere Masse haben dazu geführt, daß sie in der Folgezeit einen größeren Einfluß auf die Wettergestaltung in Rußland ausüben konnte als die am 10. an der Eismeerküste mit Nordwestwinden aufgetretene Kaltluft.

Am 12. (Tabelle umstehend) lagen die Temperaturen am Eismeer unter Null. Die Winde wehten aus östlichen Richtungen. Der Dampfdruck war allerdings nur wenig gesunken. Die kalte, am 10. in Nowaja Semlja erschienene Luft hatte auch die westlichen Eismeerstationen erreicht. Trotzdem war in den meisten Stationen Druckfall eingetreten. Er stand im Zusammenhang mit der Vertiefung einer Depression, die von Westen her langsam herangewandert war. Die Druckänderungen vom 12. Mai wurden vollständig durch dies Fallgebiet bestimmt. Kräftiges Steigen fand nur in West-

sibirien statt. Am wahrscheinlichsten ist, daß es sich hier um den östlichen Teil des Steiggebietes handelt, das am vorhergehenden Tage am Eismeer lag. Ein zweites Steiggebiet war über Polen angedeutet. Es gehörte zu der am 12. im mittleren Rußland gelegenen Depression. In Vlotslavsk begann ein langsamer Druckanstieg bereits am 11. Mai. Dabei herrschte bis zum 12. Mai morgens Windstille. Erst am Mittag frischte der Wind auf und wehte gleichzeitig aus N bis NNE. Auf die nun beginnende Advektion kalter Luft deutete der sinkende Dampfdruck, sowie die am 12. mittags eingetretene Aufheiterung. Vor dem Kälteeinbruch war das Barometer von dem tiefsten, bei den Terminablesungen gemessenen Stand gerechnet, bereits um 3.7 mm gestiegen.

Beobachtungen am Weißen Meer.

	T 12.	ΔT 11./12.	Δp 11./12.	e 12.	Δe 11./12.	Wind 11.	Wind 12.	Bewölkg. 12.
Kola	−3.4	−3.4	+0.8	2.8	−0.2	C	SSE 1	10
Kem	−3.8	−4.4	−4.3	3.0	−0.3	NE 4	NE 20	10
Archangelsk	−4.3	−3.4	−6.4	2.6	+0.3	NW 3	NE 7	10

Am 12. lagen die Verhältnisse ähnlich wie bei der Auslösung der Kältewellen des ersten Kapitels. Es war ein ausgedehntes, von kalter Luft überdecktes Gebiet vorhanden; südlich zog ein Fall- und ein Steiggebiet hin. In dem Steiggebiet begann die Südwärtsbewegung der kalten Luft (Karte 8).

Beobachtungen im Steiggebiet.

	T 13.	ΔT 12./13.	Δp 12./13.	e 13.	Δe 12./13.	Wind 12.	Wind 13.	Bewölkg. 13.
Kargopol	−6.9	−11.1	+ 4.6	2.4	−2.9	NE 1	N 7	10
Petersburg	−2.2	−10.4	+14.0	2.6	−2.9	NW 5	NNW 6	10
Smolensk	2.2	−10.4	+10.2	3.7	−6.1	C	NW 10	9
Kursk	10.6	− 2.7	+ 4.2	8.1	−1.1	WSW 6	NNW 5	10
Lugansk	17.5	+ 1.7	+ 0.3	10.3	−0.1	W 5	NNW 1	0

Die Kaltluft war nach Süden vorgestoßen und hatte bereits Smolensk überflutet, war aber noch nicht bis Kursk gelangt. Temperatur, Temperaturänderung, Dampfdruck und Dampfdruckänderung zeigen den charakteristischen Unterschied zwischen beiden Stationen in gleicher Weise. Der kräftigste Druckanstieg fand in dem Gebiete statt, das von polarer Luft bereits überflutet wurde. Wir müssen annehmen, daß der vor der Kältewelle (siehe Kursk und Lugansk) eingetretene Druckanstieg nicht niedrig-troposphärischer Natur war. Aus den Beobachtungen von Kursk und Lugansk ersieht man, daß es auch bei russischen Kältewellen Fälle gibt, in denen zuerst die Winddrehung stattfindet und ein bis zwei Termine später erst der eigentliche Kälteeinbruch erfolgt. Dies ist jedoch nicht in den Teilen des Steiggebietes der Fall, die an das Zentrum des vorhergegangenen Fallgebietes grenzen, sondern nur in dem rechts von der Bewegungsrichtung liegenden Teil des Steiggebietes.

Zusammenfassend kann man sagen, daß die Verhältnisse am Eismeer bei dem behandelten Kälteeinbruch zwar kompliziert waren und eine einfache Lösung kaum zuließen, daß sich die Kältewelle aber ähnlich verhielt, wie wir es anfangs beschrieben, sobald sie im mittleren Rußland unter den Einfluß eines von Westen herangezogenen Steiggebietes gelangt war.

Wir wollen das Auftreten der Steiggebiete in drei anderen, ähnlichen Fällen noch kurz beschreiben.

5. bis 8. Januar 1898. Leichtes Steigen bei Temperaturfall und NE-Winden auf Nowaja Semlja deutete auf die Advektion kalter Luft aus dem Eismeer hin. Am 6. Mai hatte sich die Kaltluft bis zum unteren Ob ausgebreitet. Die Abkühlung erfolgte am Ob anfangs bei fallendem Druck. Am 6. fiel das Barometer auch im europäischen Rußland stark und allgemein. In den Stationen am Weißen Meer war die kalte Luft noch nicht vorhanden, dort war das Barometer um 10—13 mm gefallen. Das zu diesem Fallgebiet gehörende Steiggebiet erschien am folgenden Tage in Westrußland und reichte von Kola nach Polen. Die Temperatur- und Druckänderungen für einige Stationen folgen: Teriberka: $\Delta p = +11.6$ mm, $\Delta T = -1.8^0$, Petersburg: $\Delta p = +4.4$ mm, $\Delta T = -1.2^0$, Wilna: $\Delta p = +3.8$ mm, $\Delta T = -1.2^0$.

Die Abkühlung in dem ganzen Steiggebiet war nicht kräftig, selbst am Eismeer nicht, trotzdem dort bereits NE-Winde herrschten. Da der Kälteeinbruch ungefähr beim Morgentermin in Teriberka

begann, kann man die geringe Abkühlung durch die Maskierung der ersten Kaltluftmassen vielleicht erklären. Die im Nordosten vorhandene Kaltluft breitete sich in dem von Westen gekommenen Steiggebiet aus. Am 8. morgens war sie bis nach Kargopol gelangt und hatte eine Abkühlung von 10—20° verursacht. Das stärkste Steigen fand innerhalb der Kaltluft statt. Ein schmales Gebiet geringen Anstiegs, der von Temperaturänderungen unabhängig war, zog sich jedoch noch durch ganz Mittelrußland bis zum Kaukasus hin. Als Beispiel sei Uspenskaja genannt: $\Delta p = +2.2$ mm, $\Delta t = +3.0^0$. Der Kälteeinbruch in Mittel- und Südrußland erfolgte erst in Begleitung eines am 9. in Polen erschienenen Steiggebietes, wie dies ja auch in ähnlicher Weise bei dem zuerst beschriebenen Fall geschah.

Dies Beispiel zeigt wiederum, wie außerordentlich günstig der Vorüberzug eines Steiggebietes für die Auslösung eines Kälteeinbruches ist. Es zeigt aber auch deutlich, wie sich zwei Steiggebiete am Eismeer aufeinander zu bewegen, das östliche in Begleitung der Kältewelle, das westliche ohne stärkere Temperaturabnahme, geknüpft an ein vorhergegangenes Fallgebiet.

11. bis 14. Dezember 1899. Das Interessante bei dieser Kältewelle ist, daß der Einbruch kalter Luft nicht auf der Rückseite eines Tiefs, sondern auf der Ostseite eines Hochs erfolgte, dessen Kern über Rußland lag. Das Hoch bestimmte den Verlauf von Kältewelle und Steiggebiet. Die Zugrichtung des Steiggebietes wich infolgedessen auch vom gewöhnlichen Verlauf ab. In der Anordnung der Steig- und Fallgebiete beim ersten Erscheinen der Kälte war die Ähnlichkeit mit der normalen zyklonalen Anordnung ziemlich groß. Die Kaltluft erschien am 13. am unteren Ob und auf Nowaja Semlja, nicht in unmittelbarem Anschluß, sondern erst in Gefolge eines Fall- und Steiggebietes. Diese lagen bereits am 11. an der Eismeerküste, das Steiggebiet über der Halbinsel Kola, das Fallgebiet bei Obdorsk. In den folgenden 24 Stunden fiel das Barometer am stärksten im nördlichen Teil von Westsibirien, während auf Nowaja Semlja und am Unterlauf des Ob Druckanstieg herrschte. In dem Steiggebiet herrschten negative und positive Temperaturänderungen bis zu 4°. Am 12. morgens war in Nowaja Semlja noch kein Anzeichen beginnender Temperaturerniedrigung vorhanden (Malye Karmakuly $\Delta p = +4.8$ mm, $\Delta T = +3.7^0$). Das Steiggebiet und das Fallgebiet lagen am nächsten Tage (13. Dezember) in Westsibirien. In Surgut, wo das Barometer zum 12. am stärksten gefallen war, befand sich der Kern des Steiggebietes, jetzt mit kräftiger Abkühlung verbunden. Das Fallgebiet war nach Osten gewandert und lag zwischen Jenissei und Ob. An der Eismeerküste war ein neues Steiggebiet erschienen, das offenbar durch den Einbruch polarer Luft hervorgerufen war. Daß es von Westen herangewandert war, kann man nicht annehmen. Anzeichen hierfür waren nicht vorhanden. Die Kaltluft und mit dieser der Barometeranstieg zogen zuerst nach Westsibirien. Die Druckänderung wurde nun fast ausschließlich durch die Zufuhr kalter Luft bestimmt.

Der Zusammenhang des Kälteausbruches mit dem von Westen gekommenen Steiggebiete war nicht so ausgeprägt wie in den bisher behandelten Fällen. Man könnte infolgedessen vielleicht annehmen, die Gründe zur Auslösung des Kälteeinbruchs lagen in der Kaltluft selber. Die enge Aufeinanderfolge von Steiggebiet ohne Temperatursturz und Steiggebiet mit Kältewelle wäre dann bloß zufällig. Nach den bisherigen Erfahrungen, die durchweg das Gegenteil bewiesen, ist dies jedoch wenig wahrscheinlich. Daß die Steiggebiete auf der Isallobarenkarte vom 12. zum 13. getrennt waren, lag wahrscheinlich daran, daß die Masse polarer Luft nicht ebenso schnell nach Süden vorstoßen konnte, wie das Fall- und Steiggebiet an der Eismeerküste hingezogen waren.

11. bis 14. Februar 1900. Die Herkunft der kalten Luft war bei dieser Kältewelle nicht einheitlich. In Malye Karmakuly wehten ESE-Winde, so daß man annehmen kann, hier erfolgte der Zufluß kalter Luft von Osten. Am Weißen Meer erfolgte augenscheinlich ein Kälteeinbruch aus Nordwesten, erst später trat bei Winden mit Ostkomponenten weitere Abkühlung ein. Die Drucksteigerung am Eismeer läßt nicht im mindesten vermuten, daß große Massen kalter Luft vom Polarmeer nach Süden strömten. Am 11., als auf Malye Karmakuly bereits Oststurm herrschte und die Temperatur in 24 Stunden um 6.6° gesunken war, fiel das Barometer in der gleichen Zeit um 8.7 mm. Ein schwaches Steiggebiet war nur in Finnland vorhanden. Am 12. hatte es sich nach Norden verlagert und dabei etwas verstärkt. Am Weißen Meere war Temperaturfall, in Kola Temperaturanstieg eingetreten. Es hat jedoch den Anschein, daß die Temperaturerhöhung in Kola nur die untersten Luftschichten betraf und nicht auf Advektion warmer Luft zurückzuführen war, da dort am 11. infolge von Ausstrahlung sehr tiefe Temperaturen herrschten. Ohne an Umfang und Energie zu gewinnen, zog das Steiggebiet nach Osten und lag am 14. Februar bereits größtenteils in Sibirien. Die bei seinem Vorüberzug nach Süden geströmte Kaltluft lagerte an der Eismeerküste und in Nordrußland. In ihrem

Bereich fiel das Barometer. Der Vorstoß nach Mittel- und Südrußland erfolgte erst im Gefolge eines am 14. im äußersten Westen von Rußland zu erkennenden Steiggebietes. Die Wanderung des Steiggebietes deutet darauf hin, daß wir es hier nicht nur mit troposphärischen Vorgängen zu tun haben, da sonst eine senkrecht auf der Fortpflanzung der Kaltluft stehende Zugrichtung des Steiggebietes nicht einzusehen wäre.

Die Erscheinungen bei den von Osten kommenden Kältewellen sind, wie wir im vorhergehenden sahen, recht kompliziert. Wir haben genügend Beispiele dafür angeführt, daß die Kaltluft sich nicht selbständig eine Druckverteilung und Luftströmung verschaffte, die ihrem Vordringen nach Süden günstig war. Sie benutzte hierzu die in ziemlich regelmäßiger Weise an ihrem Südrand vorbeiziehenden Steiggebiete. Die allein durch die Polarluft bedingten, unvermittelt im Kartenbild auftretenden Steiggebiete hatten nur als erste Anzeichen der Ansammlung kalter Luft Bedeutung. Die Änderung in der Strömungsrichtung innerhalb der Kaltluft, anfangs nach West, dann unter dem Einfluß des Steiggebietes nach Süd und Südost brauchte in den meisten Fällen jedoch vermutlich eine gewisse Zeit, da ihr die nicht unbeträchtliche Trägheit der Kaltluft hindernd im Wege stand. Es kam infolgedessen häufig vor, daß sich bereits vor der Vollendung dieses Umwandlungsprozesses schon wieder ein neues Minimum von Westen heranbewegte. Unter dessen Einfluß traten dann Winde mit südlichen Komponenten auf, und die Kaltluft wurde hierdurch in ihrem Vorstoß nach Süden aufgehalten. Es ist sehr wahrscheinlich, daß während des Vorüberganges des zweiten Fallgebietes die Zufuhr polarer Luft nicht aufhörte und infolgedessen, da eine Ausbreitung nach Süden zunächst nicht stattfand, am Eismeer ein Aufstauen kalter Luft eintrat. Die potentielle Energie der Kaltluft wurde hierdurch immer größer. Sobald nun mit dem Erscheinen des zweiten Steiggebietes, teils durch die Winddrehung nach W und NW, teils durch das Nachlassen der Winde mit südlichen Komponenten, der Druck auf die südliche Begrenzungsfläche der Kaltluft geringer wurde, erfolgte der Kälteeinbruch nach dem mittleren und südlichen Rußland. In dieser Weise werden die Erscheinungen bei den besprochenen Isallobarenkarten vom 5. bis 8. Januar 1898 zu erklären sein. Waren jedoch sogleich beim ersten Auftreten der Kälte an der Eismeerküste die potentielle Energie der Kaltluft und die Intensität des gleichzeitig vorüberziehenden Systems von Fall- und Steiggebiet ziemlich groß, so konnte sich die Kaltluft wahrscheinlich bereits in dem Steiggebiet dieses ersten Systems von Isallobaren nach Süden ausbreiten. Hierdurch entsteht ein dem beschriebenen Kälteeinbruch vom 10. zum 13. Mai 1899 ähnlicher, verhältnismäßig einfacher Fall. Daß unklare Verhältnisse am Eismeer oder die allgemeine Druckverteilung die Erscheinungen stark modifizieren, aber in ihren wesentlichen Zügen nicht verwischen können, zeigen die beiden letzten angeführten Beispiele. Auch die übrigen untersuchten Kältewellen, bei denen die Kaltluft aus dem Osten zufloß, die wegen Raummangels hier aber nicht mehr aufgeführt werden können, zeigten kein von dem beschriebenen abweichendes Verhalten. Wir können dies also als charakteristisch für einen in Nordrußland von E kommenden Kälteeinbruch ansprechen.

c) Die Kältewelle erschien am Eismeer mit Nordwestwinden.

(Typus c bei Ficker.)

In den bisher behandelten Fällen stellten sich dann im allgemeinen die einfachsten Verhältnisse ein, wenn der Kälteeinbruch auf der Rückseite eines Minimums in einem Steiggebiet erfolgte und bereits schon innerhalb der Kaltluft nicht mehr östliche Winde herrschten, sondern die Strömung der Kaltluft eine nach Süden gerichtete Komponente aufwies. Bei den jetzt zu behandelnden Kälteeinbrüchen aus Nordwesten war dies durchweg der Fall. Wir können also erwarten, hier meist einfache, aber nicht die allgemeinsten Verhältnisse zu finden. Unter den aus Nordwesten erfolgenden Kälteeinbrüchen verstehen wir nach Ficker diejenigen, die am Eismeer zuerst auf der Halbinsel Kola auftreten.

17. und 18. Februar 1902 (Karte 9 und 10). Im Nordwesten von Rußland, wo am 18. der Kälteeinbruch erfolgte, war das Barometer vom 16. zum 17. Februar stark gefallen (Karte 9). Am Ural war das Barometer gestiegen, in Westsibirien wiederum gefallen. Die Anordnung der Steig- und Fallgebiete hatte einen wellenförmigen Charakter. Ihre Amplituden waren ungefähr gleich groß.

Ostwinde zwischen dem Weißen Meer und dem Ural sowie auf Nowaja Semlja lassen es zwar als wahrscheinlich erscheinen, daß die kalte Luft aus dem östlichen Eismeer zufloß. Der eigentliche Kälteeinbruch erfolgt jedoch zuerst am Weißen Meer und zwar von Norden und Nordwesten.

Am 18. Februar (Karte 10) war das Barometer im ganzen Nordwesten von Rußland gestiegen. Das ganze Steiggebiet war bereits von kalter Luft angefüllt.

Beobachtungen im Steiggebiet.

	T 18.	ΔT 17./18.	Δp 17./18.	e 18.	Δe 17./18.	Wind 17.	Wind 18.	Bewölkg. 18.
Kem	−12.8	−12.8	+33.0	1.3	−3.1	SW 6	W 4	10
Archangelsk	−15.8	− 6.3	+24.6	—	—	SE 5	NW 5	9
Kargopol	−14.5	−12.2	+19.2	1.1	−2.3	WSW 9	W 7	0
Petersburg	−13.5	−13.1	+19.6	1.4	−1.6	WSW 13	N 2	1
Libau	−11.4	−10 2	+ 1.6	1.8	−1.6	SW 5	SSE 1	10
Uspenskaja	−10.9	− 7.2	+ 3.1	1.5	−0.7	SW 12	NNW 7	10
Nikolsk	−12.0	− 9.5	+ 1.7	1.3	−2.1	SW 17	NW 17	10

Der Gang der meteorologischen Elemente an den Stationen zeigte durchweg die für einen Kälteeinbruch charakteristischen Eigentümlichkeiten, nämlich starken Temperatursturz, sinkenden Dampfdruck und W-, NW- oder N-Winde. Die einzige Station, die nicht so gut mit allen Werten in die Tabelle paßt, ist Libau. Man beobachtete dort zwar eine ebenso starke Abnahme von Temperatur und Dampfdruck wie in den anderen Stationen, aber die Zunahme des Luftdruckes war erheblich geringer als bei den Nachbarstationen. Die Winde wehten nicht aus N wie in Petersburg, sondern aus SSE. Daraus geht hervor, daß die Polarluft Libau nicht von Norden erreicht haben kann. Die Strömungsrichtung innerhalb der Kaltluft stellt sich etwa folgendermaßen dar: Im östlichen und südöstlichen Teil erfolgte die Advektion kalter Luft mit West- bis Nordwinden und war identisch mit einem Kälteeinbruch auf der Rückseite eines Tiefs. Auf dem westlichen Flügel, in unserem Beispiel in den Ostseeprovinzen, hatte sich der Einfluß des vorangehenden Tiefs jedoch schon verloren, und die Ausbreitung der Kaltluft erfolgte im wesentlichen ähnlich dem Auseinanderfließen einer schweren Flüssigkeit, war also nach allen Seiten gerichtet. Die Winde gingen vom Kaltluftgebiet radial nach außen. Da dies in unserem Beispiel im Nordosten und Osten von Libau lag, erhalten wir in Libau ungezwungen Advektion kalter Luft mit östlichen Winden. Die Südkomponente, die der beobachtete Wind noch besitzt, mag lokal bedingt gewesen sein oder ist auf einen bei der außerordentlich geringen Stärke des Windes unterlaufenen Fehler in der Bestimmung der Richtung zurückzuführen.

Anschließend wollen wir noch einen Auszug aus den Extensobeobachtungen der Stationen geben, die in dem vorhergehenden Fallgebiet, aber in unmittelbarer Nähe des Steiggebietes, lagen.

Beobachtungen im Fallgebiet.

	T 18.	ΔT 17./18.	Δp 17./18.	e 18.	Δe 17./18.	Wind 17.	Wind 18.	Bewölkg. 18.
Wiatka	−10.2	−3.2	−8.1	1.8	−0.7	W 9	NW 17	10
Nischni-Nowgorod	− 8.5	−1.7	−3.9	2.1	−0.5	SW 6	WNW 20	10
Elatma	− 5.2	+2.1	−4.2	2.0	+0.3	WSW 7	W 9	10
Smolensk	−12.4	−2.4	−0.7	1.6	+0.4	W 6	W 3	3
Wilna	− 9.8	+1.0	−1.0	2.0	+0.5	S 3	C	0

Es ist auf eine Eigentümlichkeit hinzuweisen, die wir bereits früher erwähnt haben und die bei den Kältewellen sehr häufig auftritt. Nicht alle Stationen eines Steiggebietes weisen nämlich die Merkmale eines Kälteeinbruches auf. Einzelne Teile des Steiggebietes ragen über die Front der Kaltluft hinaus. Es zeigte sich jedoch, daß dies nie in den Stationen der Fall war, die zwischen dem Zentrum des Steiggebietes und dem des vorhergehenden Fallgebietes lagen. In diesen Stationen begann das Steigen des Barometers beim Kälteeinbruch. Da die Isallobarengebilde meist nach Osten ziehen, fand sich dies also meist beim Ostflügel der Kältewelle. Der Westflügel der Kälte verlief jedoch in einem Steiggebiet. Wir sagten im Hinblick hierauf: Die Kaltluft strömt im Steiggebiet nach Süden. Unser Beispiel vom 17. und 18. Februar zeigt zwar in sämtlichen Stationen des Steiggebietes den Kälteeinbruch, das Steiggebiet lag also vollständig hinter der Kaltfront, doch weisen die Stationen des Fallgebietes, die in unmittelbarer Nähe des Steiggebietes lagen, darauf hin, daß auch in unserem Beispiel die Kaltluft in Richtung auf das Fallzentrum sehr rasch, in den Gebieten südlich davon jedoch langsamer vordrang. Da die Nullinie auf den 24stündigen Änderungskarten nicht angibt, ob das Barometer beim letzten Beobachtungstermin im Steigen oder im Fallen begriffen war, sondern nur, daß das Barometer tiefer oder höher steht als 24 Stunden vorher, so ist es wahrscheinlich, daß die Front der Kaltluft häufig schon in den Randgebieten des Barometerfalles anzutreffen ist. Wir haben für die Isallobarenkarte vom 17. zum 18. Februar die Stationen dieses Randgebietes angeführt.

In Wiatka und Nischni-Nowgorod, die in dem Teile des Fallgebietes lagen, der dem nachfolgenden Steiggebiete zugekehrt war, beobachtete man einen Kälteeinbruch. Trotzdem war das Barometer gegen den Vortag gerade hier am stärksten gefallen; in den anderen Stationen deutete leicht steigender Dampfdruck auf die Zufuhr feuchterer Luft hin. In den östlichen Stationen folgte der Kälteeinbruch mit Druckanstieg unmittelbar auf den stärksten, nach den Terminbeobachtungen ermittelten Barometerfall, in den westlichen Stationen dagegen fiel das Barometer vor dem Kälteeinbruch entweder nur noch schwach, oder ging bereits zu leichtem Steigen über. Der Grund für dies verschiedene Verhalten der Kältewelle ist darin zu suchen, daß sich die Kaltluft zwar angenähert wie eine schwere Flüssigkeit ausbreitet, daß aber in Richtung auf das Fallgebiet noch Zusatzkräfte hinzutreten, deren Ursachen in dem Barometerminimum auf der Ostseite der Kaltluftmassen zu suchen sind. Infolgedessen rückt die Kaltluft in Richtung auf das Fallgebiet im allgemeinen schneller als nach jeder anderen Richtung hin vor. Da wir nun, wie verschiedentlich gezeigt wurde, bereits vor dem Kälteeinbruch ein System von Fall- und Steiggebiet beobachten und zur ersten Erklärung der Luftdruckschwankungen annehmen können, daß sich diesem der Druckeffekt der Kältewelle, also ein Steiggebiet überlagert, wird also das ursprüngliche Steiggebiet von der Kaltluft in den Teilen, die in der Nähe des vorhergehenden Fallzentrums liegen, rasch angefüllt sein, so daß hier Steiggebiet und Kältewelle sich decken. In anderen Teilen des ursprünglichen Steiggebietes wird sich dieser Zustand jedoch erst erheblich später einstellen.

Es erübrigt sich, für den Typus c, bei dem die Kälte zuerst im NW von Rußland auftritt, sehr viele Beispiele anzuführen. In fortgeschrittenem Zustand ähneln fast alle Kältewellen diesem Typus. Er ist in der warmen Jahreszeit etwas häufiger als in der kalten. In der Regel sind die Steiggebiete bei den sommerlichen Kältewellen schlecht entwickelt und allgemeine Regelmäßigkeiten lassen sich wesentlich schwerer ableiten. Es hat jedoch den Anschein, daß hier auch ähnliche Verhältnisse wie bei den Kältewellen des Winters herrschen. Es mag hierfür ein Beispiel folgen.

31. Mai bis 3. Juni 1902. Geknüpft an ein Fallgebiet, dessen Kern an der Eismeerküste nach Osten zog, erschien das Steiggebiet der Kältewelle am 31. Mai über Finnland und Nordskandinavien. Der Barometeranstieg betrug etwa 5—10 mm, der Temperaturfall 5—7°. Das Steiggebiet wanderte nach Osten, während die Front der Kaltluft vorwiegend von W nach E lief. Vom 31. Mai zum 1. Juni finden wir einen Barometeranstieg, der mehr als 5 mm betrug, nur bei Nowaja Semlja. Hieran schloß sich ein Gebiet schwachen Steigens, das über die Front der Kältewelle längs des Urals bis Zentralasien reichte. An den West- und Ostflügel der Kältewelle schlossen sich Fallgebiete an. Die Isallobarenkarten deuten auf einen gewissen Wellencharakter hin. Am 2. Juni lag das langgestreckte Steiggebiet in Westsibirien und hatte sich gekräftigt. Über Finnland war das Herannahen eines zweiten Steiggebietes zu erkennen. Vom 2. zum 3. Juni war das Barometer in einem relativ schmalen Streifen hinter der Kältewelle gestiegen. Es fanden sich drei Zentren stärksten Barometeranstieges. Das östliche lag schon in Zentralsibirien und war mit dem langgestreckten Steiggebiet der Isallobarenkarte vom 31. Mai zum 1. Juni identisch. Das am Ural und in Westsibirien liegende Zentrum des Steiggebietes würde mit dem am Vortage in Finnland erschienenen übereinstimmen. Das westliche dagegen kann entweder ebenfalls von Westen herangezogen sein, oder verdankt seinen Ursprung allein der Advektion der beim Vorüberzug des zweiten Steiggebietes nach Süden geströmten Polarluft. Dies letztere ist am wahrscheinlichsten, da in dem westlichen Gebiete die Abkühlung doppelt bis dreimal so stark gewesen ist, wie in den beiden anderen Zentren des Barometeranstiegs.

Wenn das Steiggebiet bei diesem sommerlichen Kälteeinbruch auch nur schwach entwickelt war, so zeigte es doch ebenfalls die bei den winterlichen Kälteeinbrüchen gefundenen Eigentümlichkeiten: Das Steiggebiet rückte von Westen heran und es erfolgte dann eine Superposition mit der Kältewelle, wobei häufig noch einzelne Teile des Steiggebietes über die Kältewelle hinaus nach Süden reichten. Trotzdem die Kaltluftmasse nach Süden vorstieß, wanderte das Steiggebiet nach Osten weiter, legte also eine gewisse Unabhängigkeit von der Advektion der Polarluft an den Tag.

d) Zusammenstellung der bisher gefundenen Ergebnisse.

Der Zweck der vorliegenden Untersuchung ist in erster Linie, einen Beitrag zu der Erklärung der Druckschwankungen an der Erdoberfläche zu liefern. Wir wollen im folgenden die bisherigen Ergebnisse zunächst unter diesem Gesichtspunkte zusammenfassen.

Alle Fragen, die die Herkunft oder den „Sitz“ der Druckschwankungen betreffen, laufen eigentlich darauf hinaus, die Fälle aufzudecken, in denen die Druckänderungen gleichsinnig mit den

Temperaturänderungen der untersten Schichten der Troposphäre verlaufen. Denn der entgegengesetzte Fall, in dem Druckfall mit Erwärmung, Druckanstieg mit Abkühlung eintritt, ist insofern trivial, als die Druckänderung wenigstens dem Vorzeichen nach völlig durch die Temperaturänderung der untersten Schichten bestimmt ist. In unserer Untersuchung werden wir unser Augenmerk also hauptsächlich auf die Gebiete mit Barometeranstieg richten müssen, die außerhalb des von der Polarluft überflossenen Gebietes liegen. Daß diese fast regelmäßig auftreten, wurde bereits gezeigt. Doch ist es nicht möglich, allein aus ihrem von der Kältewelle getrennten Auftreten zu schließen, daß ihnen eine andere Ursache als den Steiggebieten der Kältewelle im engeren Sinne zu Grunde liegt. Auch der Umstand, daß der Kälteeinbruch erst bei ihrem Erscheinen erfolgt, daß sie also den Vorstoß kalter Luft gewissermaßen verursachen, kann nicht als ein Beleg für unsere Zwecke betrachtet werden. Es läßt sich nämlich ohne Zwang annehmen, daß im Süden der Grenzfläche ein regelmäßiger Ersatz von warmer durch weniger warme Luft erfolgte, und daß beide Luftmassen an der Polarluft wie an einer Wand entlang nach Osten zogen. Da sich aber infolge des verschiedenen Gewichtes dieser wärmeren und kühleren Gebiete eine zyklonale Druckverteilung einstellen muß, so wäre es immerhin denkbar, daß der Kälteeinbruch durch die Druck- und Saugkräfte der Luft an der Begrenzung der Kaltluft verursacht wurde.

Als Erscheinungen, die jedoch eine niedrig-troposphärische Bedingtheit dieser Steiggebiete nicht als wahrscheinlich erscheinen lassen, wären zu nennen:

1. Das häufige Auftreten von Temperaturanstieg, ohne daß der Druckeffekt hierdurch wesentlich geschwächt wurde,
2. Der beträchtliche, in den von der Kältewelle unabhängigen Steiggebieten auftretende Barometeranstieg,
3. Die Superposition über das Steiggebiet der Kältewelle im engeren Sinne.

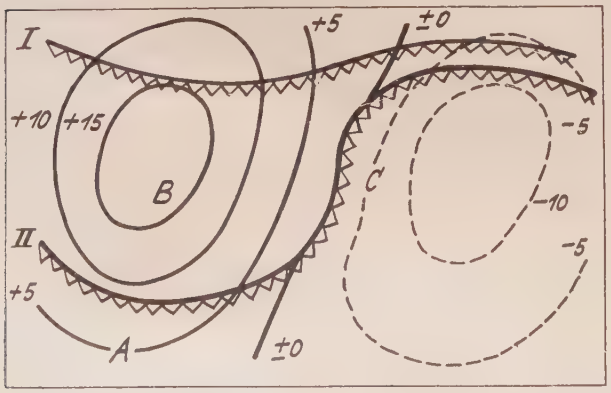
Aus den angeführten Tabellen geht hervor, daß die von der Kältewelle unabhängigen Steiggebiete nicht durchweg mit Temperaturanstieg auftraten, sondern daß die Temperaturänderung meist gering und ihrer Richtung nach wechselvoll war. Dies war jedoch sicher nur ein Vorgang in sehr seichten Schichten, da die Druckänderungen in den meisten Fällen trotz Temperaturanstieg oder Abkühlung gleich groß waren. Gegen eine Abkühlung in den mittleren Troposphärenschichten, die man als nächstes annehmen wird, spricht der Temperaturanstieg am Erdboden nicht; dies würde mit anderen Worten bedeuten, daß wir in der zweiten Art von Steiggebieten die Reste von Kaltluftkörpern zu sehen hätten, die durch lange Wanderung über eine wärmere Unterlage ihren einheitlichen Charakter als Kaltluft in den unteren Schichten völlig verloren haben. Gegen diese Auffassung ist jedoch einzuwenden, daß man meist eine nur wenig kleinere Drucksteigerung bei den von Westen kommenden Steiggebieten beobachtete, als sie bei den mit der Kältewelle auftretenden Steiggebieten zu finden war. (Siehe z. B. 16. bis 18. Februar 1899.) Wäre nur die Advektion kalter Luft in der Troposphäre beteiligt, so müßte man nur einen Bruchteil des von Norden kommenden Steigens erwarten, denn erstens fällt die Abkühlung in der Nähe des Erdbodens fort, wodurch im Hinblick auf den starken Temperaturfall bei den russischen Kältewellen bereits sehr erhebliche Unterschiede entstehen müßten, zum zweiten ist anzunehmen, daß in Rußland eine von Westen kommende Kaltluftmasse viel niedriger ist, als eine von Norden kommende, weil die Höhe der Kaltluft in erster Linie von der Zeit abhängig ist, die seit ihrer Loslösung von der polaren Kaltluftmasse verstrichen ist. Diese muß bei den von Westen kommenden Kaltluftmassen naturgemäß viel größer sein als bei den in Rußland entstandenen.

Die Superposition der beiden Arten von Steiggebieten hatten wir eingeführt, da sich durch sie die Größe und die räumliche Verteilung des Barometeranstiegs am besten ableiten ließ. Wir benutzten die Superposition in formalem Sinne, d. h. wir addierten an einem gegebenen Punkte einfach den mutmaßlichen Anstieg der Kältewelle und den, der infolge des von Westen herangewanderten Steiggebietes eintreten mußte. Dabei war es gleichgültig, ob wir annahmen, daß sich das Steiggebiet der Kältewelle dem anderen superponierte oder umgekehrt. Es ist nun klar, daß mit der rein formalen Superposition, falls sie wirklich vorhanden ist und nicht nur eine gezwungene Deutung der Beobachtungen darstellt, unbedingt auch eine Superposition der Massenänderungen, die den Barometeranstieg verursachen, einhergehen muß. Die vertikale Anordnung der Komponenten ist hierbei dann nicht mehr willkürlich wählbar; denn die Massenänderungen, die im unteren und mittleren Teil der Troposphäre eintreten, können nur mit der Advektion polarer Luft aus Norden zusammenhängen, da diese gewissermaßen durch eine undurchdringliche Fläche von der übrigen Luft abgesondert ist und sicher eine Höhe von mehreren Kilometern besitzt. Die Vorgänge, die die zweite Komponente des Druckanstiegs

bedingen, können nur über der Kaltluft ihren Sitz haben. Die sie bedingenden Massenänderungen müssen also in der oberen Hälfte der Troposphäre oder in der Stratosphäre liegen. Ob sie allerdings nur troposphärischer oder nur stratosphärischer Herkunft sind, läßt sich aus dem vorliegenden Material zunächst nicht entnehmen. Da wir aber die Erscheinung der Superposition mehrere Tage hintereinander beobachten können, ohne daß sich eine Einwirkung der Kältewelle stärker bemerkbar macht, ist es wahrscheinlich, daß sich die Massenänderungen der zweiten Art von Steiggebieten nicht in den Schichten abspielen, die unmittelbar über der oberen Begrenzung der Kaltluft liegen, da sonst eine gewisse Unabhängigkeit von dem Kälteeinbruch schlecht einzusehen wäre.

Von einigem Interesse ist auch, daß sich der Barometeranstieg als der Effekt von nur zwei Arten von Steiggebieten darstellen läßt. Dies läßt erwarten, daß wir neben den Vorgängen in niedrig-troposphärischen Schichten nur noch eine Art von Vorgängen nötig haben, um zu einer befriedigenden Darstellung der Druckänderungen zu gelangen.

Wir wollen nun von den Ursachen der Steiggebiete absehen und nur ihre Darstellung auf den Isallobarenkarten betrachten, um die allgemeine Anordnung der Steiggebiete bei der Auslösung eines Kälteeinbruches zu finden. Diese tritt augenscheinlich nicht bei den Kältewellen auf, die wir zuerst behandelten und bei denen das Nährgebiet bereits innerhalb des Beobachtungsgebietes vorhanden war, sondern in den von Osten kommenden Kältewellen, in denen das Nährgebiet im engeren Sinne erst geschaffen werden mußte. Nach den auftretenden Steiggebieten haben wir im allgemeinsten Fall zwei Abschnitte im Ausbruch der polaren Luftmassen zu unterscheiden. Man vergleiche zum folgenden die Isallobarenkarten, die für den 10. bis 13. Mai 1899 mitgeteilt sind. Der erste Abschnitt ist durch ein unregelmäßiges, nach keinem einheitlichen Gesichtspunkt erfolgendes Auftreten von kleineren Steiggebieten charakterisiert. Sie sind an der Erdoberfläche mit Temperaturfall verbunden, also augenscheinlich niedrig-troposphärischer Natur. Hier strömt polare Luft ihrem Gewicht folgend an der Erdoberfläche nach Süden, und zwar vermutlich immer nur in die Gebiete, in denen durch Temperatur- und Strömungsverhältnisse die Advektion kalter Luft aus Norden begünstigt wird. Da noch keine für einen umfangreichen Kälteeinbruch günstige Druckverteilung vorliegt, so wird sich ein großer Polarluftausbruch noch nicht entwickeln, sondern die Kaltluft kommt nur in verhältnismäßig kleinen Gebieten zur Wirkung. Dadurch wird das unregelmäßige Auftreten der Steiggebiete erklärt, daß wir besonders bei Nowaja Semlja, am unteren Ob und im Osten des Weißen Meeres häufig beobachteten. Die Kaltluftmasse wird während dieses ersten Teils des Kälteausbruches immer höher und ihre potentielle Energie immer größer. Am Südrande der Kaltluft liegt in dieser Zeit meist ein Barometerfallgebiet. Der Beginn des zweiten Abschnittes, der den Kälteeinbruch im engeren Sinne umfaßt, setzt mit dem Auftreten eines Steiggebietes am westlichen Kartenrand ein. Bei seinem Vorüberzug an der Begrenzung der Kaltluft setzt sich diese nach Süden in Bewegung. Das von Westen herangezogene Steiggebiet wird nun von der Polarluft überdeckt, und zwar rasch im Südosten und Osten, wo es unmittelbar an das ihm vorausgehende Fallgebiet grenzt, langsamer im Süden und Südwesten. Diese letzten Verhältnisse werden noch kurz in einer Skizze wiedergegeben. Sie stellt die Lage der Kaltfront in Bezug auf das sie begleitende System von Isallobaren an zwei aufeinanderfolgenden Tagen dar.



Im Gebiet B erhalten wir kombiniertes stärkstes Steigen. Im Gebiet C folgt die Kältewelle unmittelbar dem tiefsten Barometerstand, während im Gebiet A leichtes Steigen oder nur noch unbedeutendes Fallen dem Kälteeinbruche vorausgeht. Um die wirkliche Bewegung der Kältewelle zu erhalten, muß man die Bewegung des Fall- und Steiggebietes addieren.

Die bisher beschriebenen Kältewellen stellten meist Spezialfälle dieses allgemeinsten Schemas vor. Bei den Wellen des Typus a (Nährgebiet innerhalb der Karte) fiel der erste Abschnitt, die Ansammlung kalter Luft, fort. Bei den von Nordwesten kommenden Kältewellen war auch der Anfang des zweiten Abschnittes unseren Beobachtungen entzogen. Die Kaltluft hatte in den meisten Fällen bereits das von Westen herangewanderte Steiggebiet vollständig eingenommen. Durch doppelte Anwendung des Schemas auf ein und dieselbe Welle erhalten wir einen Kälteeinbruch mit zwei aufeinanderfolgenden Steiggebieten, ein Fall, der sehr häufig auftrat.

II. Die Steiggebiete bei der Wanderung der Kältewelle durch Rußland, Zentralasien und Westsibirien.

a) Bei der Wanderung der Kältewelle trat nur ein Steiggebiet auf.

Dieser Fall stellt das Einfachste dar, was wir uns denken können. Es ist also zweckmäßig mit ihm zu beginnen. Wie im ersten Kapitel soll eine Kältewelle eingehender durchgesprochen werden. Im Anschluß daran skizzieren wir noch kurz die Verhältnisse bei einer anderen Welle. Bei der Einfachheit der Verhältnisse erübrigt es sich, noch mehr Beispiele anzuführen.

31. März bis 4. April 1900. (Karte 11—15). Die Kältewelle trat am 31. (Karte 11) im Gebiete des unteren Ob und bei Malye Karmakuly auf, bereits am 29. angekündigt durch einen leichten Barometeranstieg, der jedoch am 31. nicht mehr vorhanden war. Er stellte, entsprechend dem entworfenen Schema, den ersten Teil des Kälteausbruches dar. Dagegen war das Barometer am 31. in Finnland gestiegen. Auf der folgenden Isallobarenkarte (Karte 12) hatte sich dies Steiggebiet mit der Kältewelle vereinigt und bedeckte das Gebiet zwischen dem nördlichen Ural und Finnland. Der Kern des Barometeranstiegs vom 31. März lag bei Kem mit 12.5 mm. Er zog nach Norden und lag am 1. April bei Kola mit 20.7 mm. Während also die Kältewelle nach Südwesten vorstieß, zog der Kern des Steiggebietes fast in entgegengesetzter Richtung.

Beobachtungen im nördlichen Steiggebiet.

	T 1.	ΔT 31./1.	Δp 31./1.	e 1.	Δe 31./1.	Wind 31.	Wind 1.	Bewölkg. 1.
Malye Karmakuly . .	—26.2	—3.8	+ 9.0	0.4	—0.2	ESE 20	C	0
Kola	—11.3	—7.3	+20.7	1.4	—1.8	W 3	ENE 3	6
Kem	— 6.2	—0.2	+ 6.3	2.7	+0.1	SW 4	NE 8	10
Archangelsk	— 5.2	+3.7	+ 4.5	2.8	+0.7	SW 5	NE 5	9
Mesen	—17.7	—9.4	+10.2	0.9	—1.1	S 4	NE 10	10
Perm	— 5.5	—4.0	+ 0.6	3.0	—0.7	C	W 1	4

Die Stationen des Steiggebietes vom 31. März zum 1. April lagen nicht sämtlich im Bereich polarer Luft. Sie war in Malye Karmakuly, Kola und Mesen bereits vorhanden. Diese Stationen hatten auch den stärksten Barometeranstieg. In Kem und Archangelsk erfolgte der Kälteeinbruch ungefähr beim Beobachtungstermin. Bei der Mittagsbeobachtung lagen auch diese Stationen im Bereich polarer Luft. Den Druckanstieg in diesen Stationen können wir nicht auf die Rechnung der Advektion kalter Luft setzen, da er bereits seit ein bis zwei Tagen bestanden hatte. Das kräftige Steiggebiet an der Eismeerküste war mit einem schwachen Barometeranstieg in Zentralasien verbunden. Als Repräsentant für das Verbindungsgebiet haben wir Perm angeführt. Der Temperaturfall von 4^0 ist hauptsächlich ein Effekt der Ausstrahlung gewesen, trug also zum Druckanstieg wenig bei. Das Tagesmittel war um 0.7^0 gesunken, was dem geringen positiven Δp eher entspricht.

In den nächsten 24 Stunden, also vom 1. zum 2. April (Karte 13) hatte sich der Barometeranstieg zwar ausgedehnt, war aber in dem von der Kaltluft überströmten Gebiete erheblich schwächer geworden. Im Maximum war das Barometer nur um 13 mm, gegen etwa 21 mm am Vortage, gestiegen. Es ist sehr fraglich, ob die Abschwächung des Barometeranstieges reell ist, da in dem Gebiet, in dem der Kern des Steiggebietes nach der Form der Isallobaren eigentlich liegen müßte, nämlich am nördlichen Ural, keine Stationen vorhanden sind. Der bereits am Vortage vorhandene Ausläufer nach dem zentralen Asien ist auch auf der Karte vom 2. April zu sehen. Der Druckanstieg in ihm ist jedoch bedeutend kräftiger geworden.

Eigentümlich ist, daß ein Fallgebiet in Mittelrußland, das am 1. April vorhanden war, fast verschwunden ist. Es stellte die Vorderseite einer von Westen heranwandernden Depression dar. Diese füllte sich in den folgenden Tagen aus. Ob wir hierin eine Wirkung der Kältewelle zu erblicken haben, läßt sich schwer feststellen. Eine direkte, etwa dadurch, daß das Tief von der polaren Kaltluft angefüllt wurde, ist nicht zu erkennen. Der Westflügel der Kältewelle drang jedenfalls kaum vorwärts. Der Hauptkälteeinbruch und das Hauptsteiggebiet wanderten durch Westsibirien nach Osten.

Die thermische Erklärung des Steiggebietes, das in Nordrußland auf der Isallobarenkarte vom 1. zum 2. April zu finden ist, macht keine Schwierigkeiten. Am Weissen Meer hatten wir bereits am

Vortage einen Kälteeinbruch konstatiert. Das Steigen zum 2. April kann durch das Höherwerden dieser Kaltluftmassen erklärt werden. Im nördlichen Westsibirien ist der Kälteeinbruch vom 1. zum 2. erfolgt. Als Beispiel die Werte von Bogoslovsk: $\Delta p = +10.9$ mm, $\Delta T = -10.6^0$ und von Surgut: $\Delta p = +12.9$ mm, $\Delta T = -22.6^0$.

In dem Teil des Steiggebietes, der sich an den Ostflügel der Kältewelle anschloß und sich in nordsüdlicher Richtung nach Zentralasien erstreckte, lagen die Verhältnisse nicht so einfach wie in dem offenbar rein thermisch-sekundär bedingten nördlichen Teil.

Steiggebiet im Süden der Kältewelle.

	T 2.	ΔT 1./2.	Δp 1./2.	e 2.	Δe 1./2.	Wind 1.	Wind 2.	Bewölkg. 2.
Jekaterinburg . . .	−6.2	−3.0	+7.1	2.2	−1.3	NNW 3	NE 5	4
Omsk	−7.2	−2.4	+7.7	2.2	−0.7	E 1	WNW 2	2
Kasalinsk	3.1	+2.6	+5.3	5.0	+0.6	NNW 6	NE 4	10
Aschabad	9.0	−6.1	+4.3	7.9	−1.5	NW 5	SW 2	10
Taschkent	8.2	−7.0	+1.4	6.8	−1.4	ENE 2	NW 2	10

Der Barometeranstieg in den Stationen Aschabad und Taschkent hängt offenbar mit der Advektion kalter Luft zusammen. Dieser Teil kann mit einem vom 31. zum 1. an der unteren Wolga vorhandenen Steiggebiet in Verbindung gebracht werden, jedoch fand sich hier am Vortage keine Spur von Advektion kalter Luft. Über die Herkunft der Kaltluft in den Gebieten am Rande der zentralasiatischen Gebirge läßt sich keine Auskunft geben. In Kasalinsk, das ebenfalls Druckanstieg aufwies, deutete nichts auf die Zufuhr kalter Luft an der Erdoberfläche hin. Ob sie bei den NE-Winden in der mittleren Troposphäre vorhanden war, läßt sich nicht angeben. In Jekaterinburg und Omsk kam die kalte Luft gerade am 2. morgens an. Der Druckanstieg war in den bereits von der Kältewelle überflossenen Gebieten am größten. Doch scheint es nicht unbedingt nötig, ihn lediglich auf die Kältewelle zurückzuführen. Besonders in Jekaterinburg und Omsk sind vielleicht einige Millimeter noch auf Rechnung des im Süden vorüberziehenden Steiggebietes zu setzen.

Am 3. April (Karte 14) ist im Westen ein neues Steiggebiet erschienen. Da bereits in den ersten Tagen des Kälteeinbruches am Weißen Meer Polarluft zugeflossen war und diese sich noch nicht entfernt hatte, ähnelte die gegenseitige Lage von kaltem Gebiet und Barometersteiggebiet den beim Auftreten einer Kältewelle zu beobachtenden Verhältnissen. Man könnte also mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit die Auslösung einer zweiten Kältewelle erwarten. Dies trat jedoch nicht ein. Nur in den nördlichen Teilen des neu erschienenen Steiggebietes floß kalte Luft zu, die sich jedoch nicht nach Süden ausdehnte. Den Namen einer Kältewelle verdient der Vorgang nicht. Als Beispiel für den nördlichen Teil sei Petersburg: $\Delta p = +10.1$ mm, $\Delta T = -4.7^0$, als Beispiel für den südlichen Teil des Steiggebietes Smolensk: $\Delta p = +7.1$ mm, $\Delta T = +0.9^0$ angeführt.

Das eigentliche Steiggebiet der Kältewelle lag in Westsibirien. Sein Kern befand sich ungefähr da, wo die Superposition zwischen dem von Westen kommenden langgestreckten Steiggebiet und der Kältewelle erfolgen mußte, eine südliche bis südöstliche Richtung der Kaltluftmasse und eine östliche des langgestreckten Steiggebietes vorausgesetzt.

Beobachtungen im östlichen Steiggebiet.

	T 3.	ΔT 2./3.	Δp 2./3.	e 3.	Δe 2./3.	Wind 2.	Wind 3.	Bewölkg. 3.
Jekaterinburg . . .	−13.4	− 7.2	+ 5.3	1.4	−0.8	NE 5	E 6	10
Omsk	−18.6	−11.4	+14.4	0.7	−1.5	WNW 2	C	4
Barnaul	−16.8	−15.9	+16.5	0.8	−2.7	NW 5	W 4	0
Kansk	−13.4	−11.2	+11.0	0.9	−1.5	E 2	WSW 14	9
Wernyi	1.6	−10.4	+ 4.5	4.5	−2.5	W 1	NW 1	9
Samarkand	5.1	− 0.8	+ 1.9	5.8	−0.3	SW 3	C	4

Die nördlichen Stationen zeigen durchweg die typischen Verhältnisse eines Kälteeinbruches. Bei Kansk lag die Front der Kaltluft. Der Barometeranstieg in Wernyi scheint ebenfalls durch die nach Osten wandernde Kaltluftmasse bedingt gewesen zu sein. Der starke Temperatursturz und das Sinken des Dampfdruckes ordnen Wernyi zwanglos den westsibirischen Stationen zu. Der Barometeranstieg in Samarkand hing mit der Kältewelle nicht mehr zusammen.

Am 4. April (Karte 15) lag das Steiggebiet der Kältewelle zum größten Teil bereits in Sibirien. Auf unseren Karten zeigen noch drei Stationen Druckanstieg. Am stärksten ist er in Kansk ($\Delta p = +8.7$ mm, $\Delta T = -2.3^0$). Die Erklärung des Barometeranstiegs aus troposphärischen Vorgängen ist nach den Verhältnissen vom 3. das natürlichste.

Wir wollen noch kurz eine zweite Kältewelle anführen, die nur in Verbindung mit einem Steiggebiet auftrat. Wir wählen einige Tage aus der vom 19. bis 27. Oktober 1898 Rußland und Sibirien durchquerenden Welle.

20. bis 22. Oktober 1898. Es wurde bereits im ersten Abschnitt erwähnt, daß das Steiggebiet dieser Kältewelle anfangs nicht mit Temperaturfall in großem Ausmaße verbunden war. Am 20. lag der Kern des Barometeranstiegs bei Kursk ($\Delta p = +21.1$ mm). Vom 20. zum 21. Oktober war das Steiggebiet ostwärts weitergezogen. Der Kern lag nunmehr bei Orenburg ($\Delta p = +27.6$ mm). Mit der Verstärkung des Steiggebietes war eine Vertiefung des vorhergehenden Fallgebietes verbunden gewesen. Vom 20. zum 21. Oktober war das Barometer im Kern des Fallgebietes um 12.3 mm, in den nächsten 24 Stunden jedoch um 23.8 mm gefallen. Von Orenburg zog der Kern des Barometeranstieges genau östlich weiter und lag am 22. bei Omsk. Der Luftdruck war hier in 24 Stunden um 39.2 mm gestiegen.

Wir wollen zunächst von den begleitenden Temperaturänderungen absehen und nur berechnen, welche Abkühlung innerhalb der Troposphäre eintreten müßte, um den beobachteten Druckeffekt hervorzubringen. Aus der barometrischen Höhenformel folgt durch Differentiation, daß die allein durch Temperaturänderungen hervorgebrachten Anderungen des Bodendruckes durch folgenden Ausdruck gegeben sind: $\Delta p = -\frac{p \cdot h}{R \cdot T^2} \cdot \Delta T$. Es werde h, die Höhe der Troposphäre, zu 9 km angenommen, ihre mittlere Temperatur zu -23^0. Dann geht die Formel für ΔT in die folgende über: $\Delta T = -\frac{29.3 \cdot 250^2}{760 \cdot 9000} \cdot \Delta p = -0.27\, \Delta p$. In unserem Falle würden also die folgenden Änderungen der Mitteltemperatur der gesamten Troposphäre nötig sein, um den maximalen Druckanstieg zu erklären: vom 19. zum 20.: $\Delta T = -5.7^0$, vom 20. zum 21.: $\Delta T = -7.4^0$ und vom 21. zum 22: $\Delta T = -10.6^0$. Diese Werte stehen durchaus im Mißverhältnis zu den Temperaturänderungen, die in den Kernen des Steiggebietes eingetreten sind. Der mittlere Temperaturfall betrug in den Zentren, für die wir auch die Druckänderungen mitteilten, nur $6^1/_2{}^0$. Es ist wohl kaum anzunehmen, daß die Temperaturänderungen in der Höhe wesentlich größer waren als am Erdboden; nach den bisherigen Erfahrungen muß man sogar das Gegenteil erwarten. Bedenkt man fernerhin, daß die Kaltluftmasse wahrscheinlich nicht bis ins 9-km-Niveau gereicht hat, so muß man den Schluß ziehen, daß tropospärische Abkühlung das Steiggebiet nur zum Teil verursacht haben kann.

Die Untersuchung der Wellen, bei denen nur ein Steiggebiet auftrat, ließ zwar nicht erkennen, warum eben nur eins auftrat, brachte uns aber auch keine Ergebnisse, die eine Änderung unseres im ersten Kapitel entworfenen einfachsten Schemas nötig machten. Das ausführlich besprochene Beispiel zeigte, wie zwar anfangs das von Westen herangezogene Steiggebiet die Front der Kaltluft noch überragte, wie aber die Kaltluftmasse bestrebt war, das vorhandene Steiggebiet immer mehr auszufüllen. Die kurze Beschreibung des Steiggebietes einer anderen Kältewelle zeigte, daß häufig auch die Drucksteigerung so groß sein kann, daß es unmöglich ist, sie allein durch troposphärische Abkühlung zu erklären. Aus den Verhältnissen beim Erscheinen der Kaltluft hatten wir bereits auf die Superposition zweier Steiggebiete geschlossen. Daß die weitere Wanderung des Steiggebietes in Übereinstimmung mit dieser ersten Folgerung stand, ist gleichzeitig ein Beweis für die Brauchbarkeit der in dieser Arbeit benutzten Methode.

b) Bei der Wanderung der Kältewelle traten mehrere Steiggebiete auf.

1. Die Kältewelle teilte sich nicht in verschiedene Teile.

Mehr Interesse als die Fälle, in denen bei einem Kaltluftvorstoß nur ein einziges Steiggebiet auftritt, haben naturgemäß die Fälle, bei denen wohl eine geschlossene Kaltluftmasse vordringt, aber verschiedene, von einander getrennte und in ihrer Energie wenig verschiedene Isallobarengebilde zu beobachten sind. Dieser Vorgang kann sich in zwei Variationen abspielen. Entweder sind die verschiedenen Steiggebiete schon auf einer einzigen Isallobarenkarte vorhanden, d. h. an der Front der Kaltluft ordnen sich in ziemlich regelmäßiger Aufeinanderfolge Steiggebiete und dazwischen Fallgebiete an, oder auf einer Isallobarenkarte dominiert ein Steiggebiet. Dieses bleibt aber nicht bei der Kältewelle, sondern verläßt sie, und an seine Stelle tritt ein zweites, meist von W oder NW herangewandertes

Steiggebiet. Das erste Barometersteiggebiet wird hier gewissermaßen durch ein zweites ersetzt. Im ersten Fall haben wir es mit einer Wellenbildung an der Polarfront zu tun, im zweiten erfolgt das Vordringen der Kälte stoßweise. Wir behandeln zunächst den ersten Fall.

α) Die Steiggebiete ordneten sich an der Front der Kaltluft wellenförmig an.

In der modernen Meteorologie spielt dieser Vorgang eine große Rolle. Er stellt das Zyklonenschema unter alleiniger Berücksichtigung der Steiggebiete dar. In dem von Bjerknes aufgestellten Schema für die Bildung von Depressionen an der Polarfront, das in den unteren Troposphärenschichten die Verhältnisse außerordentlich gut darstellt, beginnt die Bildung einer Depression mit einer Einbuchtung der Polarfront. Ist sie einmal vorhanden, so führt ihre Weiterentwicklung ohne Zwang zur Bildung einer Depression. Die Entstehung der ersten, geringfügigen Störung wird nach Bjerknes durch Gravitationswellen an der geneigten Grenzfläche, nach Exner durch die allgemeine Verteilung von Land und Meer, insbesondere durch die hemmende Wirkung von Gebirgen und Inseln auf die kalten polaren Ostströme erklärt. Die Betrachtung von Steiggebieten bei den Kältewellen in Rußland und Asien hat uns bisher nicht dazu gezwungen, derartigen Vorgängen bei der Auslösung der Polarluftvorstöße einen dominierenden Einfluß einzuräumen. Wir fanden immer, daß ein von Westen herangewandertes Steiggebiet, dem in den meisten Fällen ein Fallgebiet vorausging, ausschlaggebend für den Vorstoß einer Kaltluftmasse war, eine Anschauung, die sich in großen Zügen mit der Arbeitsweise des praktischen Meteorologen deckt, der immer noch der Druckverteilung bei den meteorologischen Vorgängen die Hauptrolle zuschreibt. Die Untersuchung einiger Fälle des oben bezeichneten Typus wird uns einen gewissen Anhalt zur Entscheidung der Frage geben, ob wir bei der Erklärung der wellenförmigen Anordnung der Steiggebiete uns auf Vorgänge innerhalb der Polarluft beschränken können, oder ob wir auch hierbei noch einen von ihr unabhängigen Vorgang zu unterscheiden haben.

27. bis 30. Dezember 1900 (Karte 16—19). Die Kältewelle gehört zum Typus b, die Kaltluft erschien zuerst bei Nowaja Semlja und Obdorsk am 24. Dezember. Bis zum 27. (Karte 16) hatte sie das Gebiet nördlich des 60. Breitengrades mit kalter Luft angefüllt. Das Barometer war in diesem Gebiete vom 26. zum 27. um 5—8 mm gestiegen. Über die Front der Kältewelle hinaus zog sich der Barometeranstieg in einer Höhe von 4—6 mm bis zum Asowschen Meer nach Süden.

Beobachtungen im Steiggebiet.

	T 27.	ΔT 26./27.	Δp 26./27.	e 27.	Δe 26./27.	Wind 26.	Wind 27.	Bewölkg. 27.
Archangelsk	—24.4	— 9.8	+7.8	0.4	—1.0	NE 3	N 3	2
Kargopol	—18.6	—10.0	+6.3	—	—	N 4	N 5	10
Wologda	—13.5	— 4.4	+5.4	1.3	—0.7	NW 1	NW 5	10
Uspenskaja	— 9.5	— 0.9	+5.7	2.0	—0.1	WNW 5	NW 5	10
Smolensk	— 8.0	— 1.7	+2.6	2.0	—0.4	C	C	7
Elatma	— 9.1	+ 1.1	+4.4	2.1	+0.1	SW 3	NW 3	10
Kursk	—12.3	— 6.0	+3.9	1.6	—0.4	W 3	W 2	10
Lugansk	—11.8	—12.3	+4.2	1.5	—2.6	WNW 7	W 1	0

Das Steiggebiet zerfällt in drei Teile. Im Norden erfolgte die Advektion kalter Luft vom Eismeer her. Zu diesem Gebiet gehören Archangelsk, Kargopol und als südlichste Wolodga. An diesen Teil schließt sich in Mittelrußland ein Gebiet, das gegen den Vortag ziemlich unveränderte Temperaturen aufweist. Die Südspitze des Steiggebietes umschließt wiederum Stationen mit kräftiger Abkühlung. Diese hatte mit der von Norden kommenden Kältewelle jedoch nichts zu tun und stellte wahrscheinlich den Zufluß kalter Luft aus dem mittleren nach dem südlichen Rußland dar. Nach der geringfügigen Druckänderung zu schließen, ist die zugeflossene Schicht kalter Luft nicht sehr hoch gewesen. Im Westen und Osten schlossen sich Fallgebiete an das Steiggebiet an. Das westliche war erst über Polen angedeutet, das östliche bedeckte Zentralasien und Westsibirien. Der kräftigste Druckfall war im Gebiete zwischen Ural und dem Kaspischen Meer eingetreten.

Diese Anordnung der Isallobaren verschob sich in den nächsten 24 Stunden nach Osten, und da noch ein Steiggebiet im Westen erschien, haben wir auf der Isallobarenkarte vom 27. zum 28. Dezember (Karte 17) an der Front der vom Eismeer kommenden Kältewelle eine ziemlich regelmäßige Aufeinanderfolge von zwei Fall- und zwei Steiggebieten des Luftdruckes. In dem bereits am Vortage von kalter Luft überflossenen Gebiete fand geringer Anstieg statt.

Wir geben die meteorologischen Verhältnisse an den einzelnen Stationen der Steiggebiete in der gewohnten Bezeichnungsweise wieder.

Westliches Steiggebiet.

	T 28.	ΔT 27./28.	Δp 27./28.	e 28.	Δe 27./28.	Wind 27.	Wind 28.	Bewölkg. 28.
Petersburg	—13.7	— 6.1	+5.7	1.3	—0.8	NNE 3	N 3	10
Libau	— 5.8	—11.1	+7.5	2.0	—3.8	WSW 3	ENE 5	1
Wilna	—10.0	—12.2	+5.5	1.9	—3.4	W 4	E 3	10

Man kann zwar aus den 24stündigen Änderungen die thermisch-sekundäre Natur dieses Steiggebietes kaum in Frage ziehen, doch deuten die Terminbeobachtungen vom 27. Dezember darauf hin, daß ein leichtes Steigen dem Kälteeinbruch in den südlichen Stationen vorausging, daß wir also doch Verhältnisse haben, die an die Auslösung eines Kälteeinbruches unter der Einwirkung eines von Westen herangezogenen Steiggebietes erinnern. In Petersburg als der dem Kaltluftgebiet nächsten Station erfolgte der Kälteeinbruch unmittelbar nach dem tiefsten Barometerstande, wie dies auch nach unseren am Schlusse des ersten Abschnittes entworfenen Schema für den Vorstoß kalter Luft innerhalb eines Steiggebietes der Fall sein muß.

Östliches Steiggebiet.

	T 28.	ΔT 27./28.	Δp 27./28.	e 28.	Δe 27./28.	Wind 27.	Wind 28.	Bewölkg. 28.
Perm	—22.9	—12.3	+1.1	0.6	—1.2	ESE 2	NE 3	7
Orenburg	—13.7	— 5.5	+5.2	—1.3	—0.8	SSW 4	SW 3	10
Uralsk	—15.9	— 5.8	+3.4	1.1	—0.7	WNW 4	SSW 3	10
Astrachan	— 2.7	— 3.2	+6.9	3.7	—1.1	WSW 10	S 14	10
Aschabad	2.2	+ 1.8	+5.8	4.6	—	C	NNW 2	10

Die von Norden kommende Kaltluft war bis Uralsk gelangt. Die Kältewelle scheint nur geringe Energie besessen zu haben und war, nach dem geringen Druckeffekt zu schließen, nicht sehr hoch. Sehr auffallend ist der kleine Barometeranstieg in Perm, obwohl dort der stärkste Temperaturfall eingetreten war. Ein Seichterwerden der Kaltluft kann man nicht annehmen, da Perm am 27. Dezember noch an ihrer Grenze lag und vom 27. zum 28., im ersten Teil des Kälteeinbruches, ein Anwachsen der Kaltluft über dem Beobachtungsorte am wahrscheinlichsten ist.

In Astrachan finden wir die Kältewelle wieder, die am 27. in den Stationen nördlich des Schwarzen Meeres konstatiert wurde. Die Erklärung des Druckanstiegs macht also keine Schwierigkeiten. Ob seine Größe lediglich thermisch bedingt war, kann man jedoch bezweifeln. Die Stationen Kursk und Lugansk, bei denen am 27. der Kälteeinbruch gefunden wurde, hatten nur rund 4 mm Druckanstieg zu verzeichnen. Stünde die Kältewelle noch mit dem nördlichen Kaltluftreservoir in Verbindung, so bereitete die Vorstellung eines verstärkten Zuflusses kalter Luft von Norden und damit verbunden die eines Höherwerdens der Kaltluft keine Schwierigkeit. Dies ist aber nicht der Fall, da die nördliche Kaltluftmasse durch eine Diskontinuitätsfläche nach Süden abgeschlossen ist. Wäre in Astrachan wirklich ein erneuter Zustrom kalter Luft von Norden zu verzeichnen gewesen, so müßten einmal nicht West- und Südwinde von dieser Stärke und zum zweiten nicht so hohe Temperaturen beobachtet worden sein. Aus diesen immerhin etwas problematischen Überlegungen würde man natürlich nicht schließen, daß in dem Druckanstieg in Astrachan ein nicht troposphärischer Bestandteil enthalten sei. Da aber die in der Nähe liegende Bergstation Gudaur gleichzeitig einen Barometeranstieg von 3.6 mm verzeichnete und in Aschabad ein Δp von + 5.8 mm beobachtet wurde, ohne daß irgend eine Advektion kalter Luft hier trotz dem NNW-Winde zu erkennen war, so ist man geneigt, den Überschuß von rund 3 mm, den der Barometeranstieg in Astrachan gegen den von Kursk und Lugansk am Vortage aufwies und der leidlich mit dem auf Gudaur beobachteten übereinstimmte, als „primär“ bedingt zu halten.

Auf der Isallobarenkarte vom 27. zum 28. liegt noch ein schwaches Steiggebiet am unteren Ob. Es ist zum Teil mit kräftiger Abkühlung verbunden, so daß zwar die Erklärung des Steigens an und für sich keine Schwierigkeit macht, wohl aber der geringe eingetretene Druckeffekt.

Die Verlagerung der Steig- und Fallgebiete entspricht der Guilbert-Grossmannschen Regel. Während am 28. die Reihenfolge: Steiggebiet, Fallgebiet, Steiggebiet, Fallgebiet war, ist am 29. (Karte 18) im Westen ein neues Fallgebiet erschienen, so daß nun ein Fallgebiet die Reihenfolge beginnt. Wir wenden wie bisher unsere Aufmerksamkeit nur den Steiggebieten zu.

Steigen in Mittel- und Südrußland.

	T	ΔT	Δp	e	Δe	Wind	Wind	Bewölkg.
	29.	28./29.	28./29.	29.	28./29.	28.	29.	29.
Wologda	—33.6	— 5.9	+ 5.8	0.2	—0.2	NNW 5	NW 3	0
Uspenskaja	—35.4	—17.0	+ 8.0	0.2	—0.7	NNW 6	NW 4	0
Kursk	—23.5	—21.7	+11.5	0.6	—3.0	N 5	NE 4	7
Lugansk	—10.0	—12.1	+ 7.2	1.6	—3.0	W 5	ENE 3	6
Nikolaew	— 0.5	— 0.2	+ 0.2	4.2	+0.1	C	C	10
Astrachan	0.4	+ 3.1	+ 0.6	4.7	+1.0	S 14	NW 6	10

Wologda lag schon am Vortage im Bereich der Polarluft, in den drei nächsten Stationen folgte der Kälteeinbruch unmittelbar dem niedrigsten Luftdruck, beendigte also den Barometerfall und leitete den Anstieg ein. Anders war es dagegen in Astrachan. Dort begann der Druckanstieg schon am 28. mittags, während kalte Luft erst am 29. mittags zu bemerken war. In Nikolaew finden wir eine ausgesprochene Advektion kalter Luft erst am 30. abends. Vorher ging der Druckanstieg ohne wesentliche Temperaturänderung vor sich. In Nikolaew war der totale Druckanstieg, der unter dem Einfluß des vorüberziehenden Steiggebietes auftrat, größer, als es nach der 24stündigen Änderung scheinen möchte; er betrug 3.2 mm. Man wird die Verhältnisse in Nikolaew und Astrachan schon allein deshalb beachten müssen, weil sie sich mit den Ergebnissen früherer Fälle decken. Die Betrachtung der beiden Stationen wegen des geringen Betrages der 24stündigen Druckänderung auszuschließen, ist nicht statthaft, da wir dadurch den wirklichen Verhältnissen Zwang antun würden.

Das zweite Steiggebiet, das sich am 28. Dezember vom Ural nach Süden zog, lag am 29. mit seinem Kern in Zentralasien und war durch eine schmale Zone mit einem allerdings schwachen Steigen über Nordrußland verbunden.

Östliches Steiggebiet.

	T	ΔT	Δp	e	Δe	Wind	Wind	Bewölkg.
	29.	28./29.	28./29.	29.	28./29.	28.	29.	29.
Jekaterinburg . . .	—27.9	—3.3	+1.8	0.4	—0.1	N 3	NNE 4	10
Wernyi	— 6.8	+4.4	+5.9	2.3	+0.6	S 1	C	6
Taschkent	— 0.2	—4.8	+1.9	4.3	—1.3	SW 4	N 2	10
Belagatschkoe Zimovie	— 8.0	—1.8	+1.9	1.7	—0.4	SSE 14	SSW 9	9

Während in den meisten Stationen die Druckänderung mit dem Druckeffekt der Temperaturänderung dem Vorzeichen nach übereinstimmte, finden wir gerade in Wernyi, das die größte positive Druckänderung im zentralasiatischen Steiggebiet besaß, einen beträchtlichen Temperaturanstieg. Wenn zwar sein Betrag durch Ausstrahlungskälte am 28. erhöht wurde, so konnte dadurch doch nicht eine Verschleierung der Abkühlung der untersten Troposphärenschichten bewirkt worden sein. Also für den größten Druckanstieg dieses Steiggebietes können wir mit Hilfe der Vorgänge am Erdboden keine Erklärung geben. In demselben Steiggebiet hatten wir am 28. Dezember eine Kältewelle konstatiert, von der wir allerdings infolge ihrer geringen Wirkung auf den Druckgang annahmen, daß sie nicht sehr hoch reichen würde. Sie füllte lediglich den nördlichen Teil des Steiggebietes aus, während wir in dem südlichen nicht-troposphärische Vorgänge vermuteten. Es ist nun bei der wahrscheinlich geringen Höhe der Kältewelle sehr gut möglich, daß sie inzwischen verschwunden ist. Wir haben dann von dem Steiggebiet am 28. nur noch den nicht niedrig-troposphärischen Bestandteil am nächsten Tage zu erwarten, d. h. der südliche Teil würde, eine größere Konstanz des primären Bestandteils vorausgesetzt, — was wahrscheinlicher ist, als das Gegenteil — im wesentlichen unverändert bestehen bleiben, während der nördliche infolge des Verschwindens der Kältewelle ebenfalls verschwinden müßte. Verlagern wir nun das so modifizierte Steiggebiet nach Osten, so erhalten wir das Steiggebiet des Barometers vom 28. zum 29. Gewiß kann man aus den Verhältnissen am Erdboden keinen absolut einwandfreien Beweis führen, daß es sich wirklich um zwei Steiggebiete handelt, deren Ursachen in

verschiedenen Schichten liegen. Da es aber sicher ist, daß an der Erdoberfläche immer wiederkehrende Unterschiede zwischen beiden da sind, und da man den Erscheinungen am besten gerecht wird, wenn man beide Teile als von einander unabhängig betrachtet, so wird man es zum mindesten in hohem Maße für wahrscheinlich halten, daß wir es auch in Wirklichkeit mit Vorgängen zu tun haben, die ganz verschiedenen Schichten der Atmosphäre ihre Entstehung verdanken, besonders da ihre Begleitumstände in einer, nämlich der untersten Schicht bereits als verschieden aus den Beobachtungen erwiesen sind.

An der Isallobarenkarte vom 29. zum 30. Dezember 1900 (Karte 19), die wir als letztes ausführliches Beispiel für die wellenförmige Anordnung von Steiggebieten an der Polarfront betrachten wollen, finden wir wiederum eine der Guilbert-Grossmannschen Regel entsprechende Verschiebung der Isallobarengebilde nach Osten. Doch nimmt das am Vortag ein Mittel- und Südrußland gelegene Steiggebiet eine dominierende Stellung ein. Sowohl an Umfang wie an eingetretener Drucksteigerung überragt es die anderen etwa um das Doppelte. Des weiteren ist auffällig, daß die Steiggebiete gegen die anderen Tage ungewöhnlich weit nach Norden reichen.

Bei der Besprechung der einzelnen Steiggebiete beginnen wir wieder wie bisher im Westen:

Westliches Steiggebiet.

	T	ΔT	Δp	e	Δe	Wind	Wind	Bewölkg.
	30.	29./30.	29./30.	30.	29./30.	29.	30.	30.
Libau	−15.4	− 2.2	+7.5	1.0	−0.4	E 7	ESE 7	2
Wilna	−14.8	− 3.0	+1.7	1.3	−0.4	E 4	NE 4	10
Vlotslavsk	− 6.5	−10.1	+6.1	2.4	−3.0	WSW 2	N 3	10

Zur Erklärung des Druckanstieges in Libau und Wilna kann man erneuten Zufluß kalter Luft von Norden und Osten annehmen. In diesen Stationen begann am 30. erst die größte Kälte, obwohl sie schon einige Tage im Bereich polarer Luft lagerten. Bei Vlotslavsk dagegen beobachten wir den Einbruch kalter Luft. Bezeichnend ist, daß dem Kälteeinbruch in der Nacht vom 29. zum 30. bereits ein schwacher, aber stetiger Druckanstieg am 29. voranging. Er war allerdings sehr gering und betrug vom 29. morgens bis zum 29. abends nur 0.9 mm. In Libau und Wilna die Verhältnisse nach dieser Richtung hin zu untersuchen, ist kaum möglich, da der erneute Zufluß kalter Luft aus Norden hier sehr schwer zeitlich exakt zu begrenzen ist.

Mittleres Steiggebiet.

	T	ΔT	Δp	e	Δe	Wind	Wind	Bewölkg.
	30.	29./30.	29./30.	30.	29./30.	29.	30.	30.
Kargopol	−34.9	− 1.6	+ 6.5	—	—	N 2	N 1	0
Wiatka	−32.2	− 4.2	+ 8.3	0.3	−0.1	NNW 3	NW 5	3
Orenburg	−25.3	−13.6	+16.9	0.8	−0.7	WNW 3	NW 1	0
Astrachan	−12.9	−13.3	+ 8.3	1.3	−3.4	NW 6	E 4	10
Kasalinsk	− 8.6	− 9.1	+ 6.0	2.0	−2.6	SSW 12	NNW 3	9
Aschabad	1.8	+ 3.0	+ 1.6	4.1	+0.1	S 1	S 2	0

In den vier ersten Stationen macht die Erklärung des Druckanstiegs kaum Schwierigkeiten. In Kargopol und Wiatka, die sehr tiefe Temperaturen, aber nur geringen Temperaturfall zeigen, handelt es sich vermutlich um das Höherwerden der Kaltluft. In Orenburg und Astrachan verstärkte sich bez. vollzog sich vom 29. zum 30. der Zufluß kalter Luft. Auch in Kasalinsk scheinen die Verhältnisse nach den 24stündigen Anderungen sehr einfach zu liegen. Nach den Terminbeobachtungen begann hier jedoch der Druckanstieg bereits am 29. mittags, die ersten Anzeichen der Ankunft polarer Luft waren aber erst am 30. früh vorhanden. Der Druckanstieg begann auch in Aschabad am 29. mittags. Ein Zusammenhang mit dem Temperaturgange war hier nicht zu erkennen. Die Verhältnisse an beiden Stationen erinnern an die von Nikolaew und Astrachan am vorhergehenden Tage.

Das östlichste der Steiggebiete des 30. (Tabelle umstehend) wird man mit dem am Vortage in Zentralasien eingetretenen Barometeranstieg in Zusammenhang bringen müssen.

Die Vorgänge in den unteren Luftschichten haben sich in dem Steiggebiet gegen den Vortag sehr geändert. Erwärmung trat nur noch in Kansk auf. Barnaul und Tomsk hatten Temperaturfall,

dessen Größe zum Teil recht bedeutend war. Er scheint jedoch nicht nur auf die Ankunft einer neuen Luftmasse zurückzuführen zu sein, sondern auch auf eine temperaturerhöhende Wirkung des Windes am 29. In Tomsk und Barnaul sind die Winde am 29. ungefähr doppelt so stark gewesen als am 30. Dadurch wurde eine stärkere Durchmischung der Luft hervorgerufen, die zur Erwärmung der untersten Luftschichten auf Kosten der oberen führte[9]). Die Temperaturänderungen in Kansk deuten an, daß man auch am 30. noch einen kleinen Teil des Druckanstiegs mit den Vorgängen in

Östliches Steiggebiet.

	T	ΔT	Δp	e	Δe	Wind	Wind	Bewölkg.
	30.	29./30.	29./30.	30.	29./30.	29.	30.	30.
Barnaul	— 9.3	— 3.8	+1.7	1.6	—1.1	SW 12	SE 5	10
Tomsk	—15.3	—13.0	+8.6	1.2	—2.1	SSE 10	SE 6	10
Kansk	— 7.8	+ 9.3	+1.0	1.6	+0.6	C	SW 1	10

den untersten, bodennahen Schichten nicht in Zusammenhang bringen kann. Nimmt man von diesem Steiggebiet auch an, daß es seinen Ursprung zum größten Teil den Temperaturänderungen in den untersten Atmosphärenschichten verdanke, so geht doch aus den Windbeobachtungen hervor, daß es sich nicht um die Advektion kalter Luft von SW, woher das Steiggebiet aller Wahrscheinlichkeit nach gekommen ist, handeln kann. Der Temperaturfall innerhalb des Steiggebietes ist also in Westsibirien erst entstanden, das Steiggebiet war nicht immer mit einer Kaltluftmasse verbunden.

Bevor wir eine Zusammenfassung geben, wollen wir, wie bisher, noch einige andere Beispiele kurz anführen.

8. bis 10. Januar 1898. Die Steiggebiete der einzelnen Wellen sind nicht immer so gut entwickelt, wie es in dem ausführlich behandelten Fall zu sehen war. Dadurch, daß sich die Hauptmasse kalter Luft später in ein Steiggebiet ergoß, wurde eins häufig (wie z. B. bei unserem ausführlicher behandelten Beispiel das mittlere auf der Isallobarenkarte vom 29. zum 30.), erheblich stärker als die anderen. Ein ähnliches Herausheben eines Steiggebietes aus der wellenförmigen Reihenfolge durch den Vorstoß der Hauptmasse der Polarluft sehen wir auch auf den Isallobarenkarten vom 8.—10. Januar 1898. Am 8. hatte die Polarluft das nördliche Rußland überflutet und daselbst einen Barometeranstieg von etwa 10—13 mm hervorgerufen. An dieses Steiggebiet schloß sich im Süden ein schmales Gebiet mit wenig Barometersteigerung und Erwärmung an (Uspenskaja $\Delta p = +2.2$ mm, $\Delta T = +3.0^0$), das sich durch Mittelrußland nach dem Kaukasus hinzog. Im südlichsten Teil war ein leichter Kälteeinbruch zu konstatieren. Das Steiggebiet lag am 8. ungefähr vor der Mitte der Kaltluftmasse, an den West- und Ostflügel schlossen sich Fallgebiete an. Durch Ostwärtsverlagerung der Isallobarengebilde, durch das Auftreten eines neuen Steiggebietes im Westen der Karte und durch Südwärtsbewegung der Polarluft, infolgedessen auch des durch sie bedingten thermisch-sekundären Steigens ging die Isallobarenkarte vom 8. zum 9. aus der vom 7. zum 8. Januar hervor. In das neue, im Westen erschienene Steiggebiet drang die Polarluft energisch ein. Im Norden, z. B. in Petersburg, begann das Steigen des Barometers mit ihrem Einbruch, in den mittleren und südlichen Stationen stieg das Barometer dagegen schon vor der Ankunft der Kaltluftmasse leicht. Grund zu der Annahme, daß sich die von Norden kommende Kältewelle zuerst in einiger Höhe bemerkbar machte, ähnlich wie dies bei den maskierten Kälteeinbrüchen in Mitteleuropa der Fall ist, ist nicht vorhanden. Wir müssen die leichte Drucksteigerung vor dem Kälteeinbruch als die Andeutung eines von Westen gekommenen Steiggebietes auffassen. Auf Superposition weist auch der Umstand hin, daß wir durchweg 15 mm Druckanstieg, dagegen nur 2—5° Temperaturfall beobachten konnten. Die Druckänderungen vom 9. zum 10. Januar weisen ein mit der Kältewelle zusammenhängendes starkes Steigen in Mittel- und Südrußland, ein schmales und schwächeres in Westsibirien und dem nördlichen Zentralasien auf. Bezeichnend ist, daß sich im südöstlichen Teil des westlichen Steiggebietes Stationen fanden, die 5—6 mm Druckanstieg ohne Abkühlung oder andere Anzeichen für die Advektion kalter Luft besaßen. Das Steigen im nördlichen Zentralasien fand mit Abkühlung statt, die jedoch noch nicht mit der von Norden kommenden Kältewelle zusammenhing und sich nur in den Morgentemperaturen bemerkbar machte. In Kasalinsk z. B. trat ein Druckanstieg von 4.7 mm bei einem Temperaturfall von 4.0° ein, aber die eigentliche Kältewelle kam erst am 12. Januar.

4. bis 6. November 1902. In der Anordnung der Steiggebiete besteht eine große Ahnlichkeit mit dem vorigen Fall. Am 4. erstreckte sich ein Steiggebiet über die Front hinaus nach Süden. Im Bereich der Kaltluft war das Barometer etwa um 15—18 mm, vor ihrer Front aber immer noch um 10—12 mm gestiegen. Die Verschiedenheit beider Teile des Steiggebietes soll durch die Gegenüberstellung zweier Stationen gezeigt werden. Im Gebiet polarer Luft war in Mesen ein Druckanstieg von 18.1 mm, ein Temperaturfall von 15.4° beobachtet worden, in dem sehr viel südlicher liegenden Kursk dagegen war das Barometer um 11.4 mm gestiegen, die Temperatur aber nur um 3.3° gesunken. Diese Temperaturabnahme von 3.3° war meist durch stärkere Ausstrahlung am 4. bedingt worden. Im Tagesmittel erhalten wir in Kursk nur eine Abkühlung von 0.8°. Die Mittags- und Abendtemperaturen waren am 4. höher als am 3. November. Die Verlagerung der Isallobarengebilde entspricht der Guilbert-Großmannschen Regel. Das langgestreckte Steiggebiet vom 4. finden wir am 5. am Ural und in Zentralasien. Am Ural ist Advektion kalter Luft erfolgt, ebenso in Zentralasien; hier war auch der stärkste Barometeranstieg eingetreten, obwohl der Temperatursturz nur die Hälfte und weniger von dem betrug, der am Ural eingetreten war. Ein am 5. November im Westen neu erschienenes Steiggebiet wies in seinem größten Teil geringe Abkühlung auf. Von polarer Luft angefüllt war es jedoch noch nicht. In Übereinstimmung mit den meisten Karten, die eine wellenförmige Anordnung der Isallobaren zeigten, war der mäßige, aber ziemlich weit verbreitete Barometeranstieg im Norden der Kaltfront. Die wellenförmigen Fall- und Steiggebiete lagen mit ihren Zentren meist südlich der Front. Doch bedingten sie auch innerhalb der Kaltluft ein Wandern der Stellen mit maximalem Anstieg des Barometers in west-östlicher Richtnng. Dies legt den Gedanken der Superposition von zwei Arten von Steiggebieten nahe. Das mit der Kältewelle zusammenhängende erstreckte sich von Westen nach Osten und schritt wenigstens anfangs von Norden nach Süden fort. Diesem Steiggebiet überlagerten sich verhältnismäßig schmale, von Süden nach Norden sich erstreckende Steiggebiete, deren Fortbewegung im allgemeinen von Westen nach Osten gerichtet war.

Die Isallobarenkarte vom 5. zum 6. November 1902 zeigte an den Stellen, an denen am Vortage Steiggebiete lagen, Fallgebiete und umgekehrt. Wir finden infolgedessen ein Steiggebiet in Westsibirien und eins in West-, Mittel- und Südrußland. In beiden Steiggebieten überwog Temperaturfall, doch waren sie noch nicht von der von Norden kommenden Kaltluft völlig angefüllt. Das westliche Steiggebiet nahm die Kaltluft immer mehr in seinen Bereich auf und vergrößerte sich stark, so daß die Verhältnisse vom 7. an denen ähnelten, die auftraten, wenn der gesamte Vorstoß der Kaltluft nur in Verbindung mit einem Steiggebiet erfolgte.

Im Anfang dieses Abschnittes wurde darauf hingewiesen, daß die hier behandelte Anordnung von Steiggebieten an der Front der Kältewelle eine große Ähnlichkeit mit dem von Bjerknes aufgestellten Schema der serienweisen Entwicklung von Zyklonen an der Polarfront besitzt. Wir brauchen in unseren Beispielen nur je ein Steig- und ein Fallgebiet zu einer Depression zusammenzufassen, um das Bjerknessche Schema zu erhalten. Eine dem Schema entsprechende Wellenform der Polarfront, die in unseren Beispielen durch die Front der Kältewelle dargestellt wurde, fanden wir jedoch nicht. Sie war wohl angedeutet, entsprach aber keineswegs der Erstreckung der Steiggebiete. Wir müssen also daraus schließen, daß die Steiggebiete nicht direkt durch eine südliche Ausbuchtung der Polarfront entstanden sind. Sie wurden ja durch sie in zwei, hinsichtlich ihrer Temperaturänderungen ganz verschiedene Teile zerspalten. In dem südlichen, außerhalb der Kaltluft liegenden Teile des Steiggebietes konnten wir zwei Klassen von Stationen unterscheiden, einmal solche, bei denen der Druckanstieg mit mäßigem Temperaturfall, und zweitens solche, bei denen kaum eine Temperaturänderung oder sogar Erwärmung eintrat. Daraus ergeben sich zwei Möglichkeiten der Erklärung des Barometeranstiegs und in gewissem Sinne auch für die Bildung der Depressionen.

Einmal kann man nämlich den Temperaturanstieg als eine sehr zufällige und für das Ganze nicht wesentliche Erscheinung auffassen und das Hauptgewicht auf den Temperaturfall legen. Dann würde man auch den über die Polarfront nach Süden sich erstreckenden Druckanstieg als troposphärisch bedingt auffassen. Da jedoch dieses Steiggebiet von Westen nach Osten wanderte und bei seinem Erscheinen gezeigt werden konnte, daß in dem südlichen Teil erst der Druckanstieg und dann die von Norden kommende Polarluft kam, so muß man also annehmen, daß die Kaltluft, die das Steiggebiet im Süden der Kältewelle hervorrief, in der Regel bereits West- und Mitteleuropa überquert habe. Dadurch hatte sie den Charakter als Kaltluft in den untersten Schichten verloren, konnte also stellenweise auch Erwärmung bringen. Da sich nun beim Vorüberzug solcher Steiggebiete häufig erneutes kräftiges Vordringen kalter Luft nach Süden oder die Bildung bez. Kräftigung von Depressionen

einstellte, so hätten wir hierfür eine der Polarfronttheorie entsprechende Erklärung gefunden. Den Anstoß zur Bildung von Depressionen an der Polarfront haben dann in den hier behandelten Fällen weder Gravitationswellen noch Vorgänge innerhalb der Polarluft gegeben, sondern Kaltluftmassen, die sich bereits vor längerer Zeit aus dem Polargebiet losgelöst hatten und nun nach Osten zogen. Man wird die anderen Erklärungsweisen in Rußland wenigstens auf die Fälle beschränken, in denen zuerst ein Zufluß kalter Luft vom Polarmeer völlig selbständig erfolgte, also auf das bereits früher beschriebene erste Stadium eines Polarluftausbruchs. Damit soll jedoch nur gesagt sein, daß sich in Rußland nach der vorliegenden Untersuchung die Bildung von Depressionen scheinbar öfter im Anschluß an bereits vorhandene und unter der obigen Voraussetzung thermisch-sekundär bedingte Störungen vollzieht als völlig unabhängig von der gegebenen Druck- und Strömungsverteilung. In anderen Gegenden der Erdoberfläche, die ebenfalls durch häufige Polarluftausbrüche ausgezeichnet sind, können die Verhältnisse durchaus anders liegen. Nach den Erfahrungen im täglichen Wetterdienst und eigenen Untersuchungen über amerikanische Kältewellen halte ich es jedoch für sehr wahrscheinlich, daß die Mehrzahl der Kältevorstöße von Grönland her ebenfalls vorbeiziehenden, meist von Amerika gekommenen Störungen den Hauptanstoß zum südlichen Vordringen verdankt.

Man kann jedoch auch bei den über die Front der russischen Kältewellen hinausreichenden Steiggebieten das Hauptgewicht auf die oft vorhandene Unabhängigkeit vom Gange der Temperatur legen und die mitunter vorhandene Temperaturerniedrigung als weniger wesentliche Erscheinung auffassen. In Fortführung dieses Gedankenganges wird man diese Steiggebiete also als eine Andeutung drucksteigernder Vorgänge in höheren Atmosphärenschichten anzusehen haben. Als einen der triftigsten Gründe für diese Anschauung hatten wir bereits früher die Erscheinung der Superposition der verschiedenen Arten von Steiggebieten bezeichnet. In dem eben behandelten Material läßt sich aber hierfür ein weiteres Beispiel finden, nämlich die Wanderung der innerhalb der Kältewelle auftretenden Stellen stärksten Barometeranstiegs von Westen nach Osten, wobei sie immer als nördliche Fortsetzung des wellenartigen Steiggebietes auftraten. Die Wanderung dieser Gebiete kann nicht als eine sich von Westen nach Osten fortpflanzende Hebung der oberen Begrenzung der Kaltluft betrachtet werden. Denn sonst müßten im Westen irgendwelche Anzeichen für die Ansammlung kalter Luft und wohl auch eine gewisse Verzögerung des Steiggebietes innerhalb der Kältewelle gegen das im Süden angrenzende gefunden werden. Die Hebung und Senkung der oberen Begrenzungsfläche wird wahrscheinlich auch in geringem Maße zu beobachten sein, doch wird sie mehr als Wirkung der vorüberziehenden Fall- und Steiggebiete als als die Wirkung anderer Ursachen, etwa der konstanten Westwinde in der Höhe im Sinne von Exner, aufzufassen sein. Die letztere Ursache würde auch nicht das rasche und wiederholte Aufeinanderfolgen der Steigezentren erklären. In den Fällen, in denen die Steiggebiete in genügender Nähe vom Kaukasus vorüberwanderten, so daß man auch die Beobachtungen von Gudaur in 2204 m Meereshöhe zur Beurteilung der Herkunft der Druckschwankung heranziehen konnte, wie z. B. bei der ersten ausführlich behandelten Kältewelle, zeigten sich die Wellen auch im Barometergang der Höhenstation, während sie im Temperaturgange nicht zu entdecken waren. Auch dies spricht für ihre primäre Bedingtheit.

Die Wellenform der Isallobarengebilde hatte bei den untersuchten Kältewellen selten langen Bestand. Aus Gründen, die sich aus der vorliegenden Untersuchung nicht erkennen lassen, erfolgte beim Vorüberzug irgend eines Steiggebietes plötzlich der Hauptvorstoß kalter Luft nach Süden. Intensität und Umfang des ursprünglichen Steiggebietes wurden immer größer, es dominierte schließlich und unterdrückte die Ausbildung weiterer Wellen. Oft leiteten wellenartige Steiggebiete auch die Teilung einer Kältewelle ein. Immer stellten sie nur einen kurzen Abschnitt in der Lebensgeschichte einer Kältewelle dar, und es war immer das Bestreben zu erkennen, in den einfachsten Zustand, nämlich ein Steiggebiet und eine Kältewelle, überzugehen.

Die starke Kräftigung und Vergrößerung eines Steiggebietes durch den Einbruch kalter, vorher im Zustand der Ruhe befindlicher Luftmassen aus Norden hat dazu geführt, eine in Ruhe befindliche Kaltluftmasse als ein „latentes“ Steiggebiet zu betrachten. Dieser Begriff wird sich im nächsten Abschnitt, wo wir das etappenweise Vorrücken der Kältewelle behandeln wollen, als sehr nützlich für die Charakterisierung gewisser Vorgänge erweisen.

Zum Schluß dieses Abschnittes sei hier noch einmal darauf hingewiesen, daß die angeführten Isallobarenkarten nicht als Beweis, sondern als Beispiele aufzufassen sind. Die oben angeführten Anschauungen haben sich aus der eingehenden Untersuchung von weit mehr Isallobarenkarten mit wellen-

förmiger Anordnung von Steig- und Fallgebieten ergeben. Diese konnten jedoch nicht alle wiedergegeben werden. Das Wesentliche zeigen uns auch die angeführten Fälle. Wenn auch in dieser Untersuchung in einem Abschnitt nur ein Fall ausführlich und zwei bis drei noch kurz besprochen wurden, so muß man doch bedenken, daß wir die für uns in Betracht kommenden Erscheinungen in den verschiedensten Variationen immer wieder finden, so daß die in dem einen Abschnitt geschilderten Verhältnisse zum Beweis und zur Kontrolle der Erscheinungen, die in einem anderen dargelegt wurden, benutzt werden können. Die Methode, die wir in dieser Arbeit befolgen müssen, beruht ja darauf, die Steiggebiete bei den verschiedensten Stadien einer Kältewelle zu untersuchen, um zuletzt die in allen gemeinsam vorkommenden Erscheinungen zu erhalten. Das wird uns dann eine gesicherte Grundlage geben, die Frage zu entscheiden, ob wir bei der Erklärung der unperiodischen Druckschwankungen auf die Annahme nicht niedrig-troposphärischer Vorgänge verzichten können oder nicht.

β) Die Steiggebiete traten hinter der Front der Kältewelle in Intervallen auf. (Etappenweises Vorrücken der Kaltluft.)

Vollzieht sich das Vorrücken der Kaltluft in einzelnen Abschnitten, indem auf Tage mit raschem Vordringen solche mit langsamerer oder fast völlig fehlender Ausbreitung folgen, so spielen sich auch in dem Steiggebiete einer Kältewelle bestimmte Veränderungen ab. Die Tage mit raschem Vordringen der Kältewelle sind durch das kräftigste Steigen, solche mit Stagnieren der Kaltluft durch schwachen oder ganz fehlenden Barometeranstieg ausgezeichnet. Eine in Ruhe befindliche Kaltluftmasse stellt ein latentes Steiggebiet dar. Dieses tritt sofort dann in Erscheinung, wenn die Kaltluftmasse irgendwie in Bewegung gesetzt wird. Infolge des stoßweisen Vorrückens der Kaltluft erhalten wir ein unterbrochenes Auftreten von Steiggebieten hinter der Kältewelle.

Wir werden im folgenden sehen, daß in Wirklichkeit einfache Beziehungen zwischen dem Auftreten des Steiggebietes und dem Vorrücken der Kältewelle nicht bestehen, jedenfalls nicht solche, die das Auftreten des Steigens allein aus der Bewegung der Kaltluft heraus erklären.

Beispiele für diesen Abschnitt haben wir bereits angeführt, als wir die Verhältnisse beim Auftreten der Kältewellen an der Eismeerküste behandelten. Wir fanden, daß die Steiggebiete dort häufig von Westen nach Osten über die Kaltluft hinwanderten, ohne daß sich eine ähnliche Bewegung der Kaltluft vollzogen hätte. Sehr häufig kam es vor, daß der Kälteeinbruch in Mittel- und Südrußland dann mit einem zweiten von Westen gekommenen Steiggebiet zusammenfiel.

Wir werden uns im folgenden darauf beschränken, das Abwechseln von Steiggebieten bei Kältewellen in mittleren und südlichen Rußland, in Zentralasien und Westsibirien zu verfolgen. Das sehr häufige Auftreten dieses Typus am Eismeer wollen wir hier übergehen, um Wiederholungen mit dem ersten Kapitel zu vermeiden. Dies empfiehlt sich auch schon aus dem Grunde, weil wir in mittleren Breiten ein ausgedehnteres und dichteres Netz von Beobachtungsstationen als an der Eismeerküste zur Verfügung haben.

14. bis 19. Februar 1900 (Karte 20—25). Das Auftreten der Polarluft am Eismeer erfolgte in Begleitung eines von Westen nach Osten ziehenden Steiggebietes. Es lag am 14. (Karte 20) am unteren Ob. Der größte Teil des europäischen Rußlands, auch die Eismeerküste, wurde von einem Fallgebiet des Barometers eingenommen. Die Temperaturen lagen im Fallgebiet infolge eines vorhergegangenen Kälteeinbruches recht tief. Die Winde deuteten ein Auseinanderfließen dieser Kaltluft an, während sich die neu herangeströmte Polarluft durch N-Winde deutlich von der vorhandenen Restschicht abhob. Ihr Einbruch konnte an den einzelnen Stationen trotz der schon vorher herrschenden niedrigen Temperatur genau nach Terminablesungen festgelegt werden. An der Ostsee war am 14. schwacher Druckanstieg angedeutet.

Steiggebiet an der Ostsee.

	T	ΔT	Δp	e	Δe	Wind	Wind	Bewölkg.
	14.	13./14.	13./14.	14.	13./14.	13.	14.	14.
Libau	—1.6	—1.9	+3.0	3.3	—1.1	S 5	NW 6	10
Vlotslavsk	—9.2	—1.4	+1.7	2.2	—0.2	C	C	10

Bei Libau erhalten wir aus den Werten die Überzeugung, daß es sich um einen Kälteeinbruch handelt. Er begann am 14. morgens. In Vlotslavsk herrschte Windstille, am 14. mittags begannen

Nordostwinde zu wehen; der Dampfdruck sank jedoch erst am 15. mittags. Vor diesem Termin kann also eine Advektion kalter Luft nicht angenommen werden, trotzdem schon vorher Nordostwinde herrschten.

Auf der nächsten Isallobarenkarte vom 14. zum 15. (Karte 21) hatte das am Vortage im Westen angedeutete Steiggebiet bereits die ganze Westhälfte von Rußland überdeckt. Das Fallgebiet lag mit seinem Kern am Ural.

Östlicher Teil des Steiggebietes.

	T 15.	ΔT 14./15.	Δp 14./15.	e 15.	Δe 14./15.	Wind 14.	Wind 15.	Bewölkg. 15.
Kem	—20.4	—5.0	+3.9	0.7	—0.5	NE 6	NW 6	10
Wologda	—15.4	—5.0	+2.8	1.1	—0.7	ESE 2	NW 2	10
Elatma	—11.1	—3.2	+6.9	1.7	—0.6	SE 10	SW 3	10
Kursk	— 8.6	—8.4	+8.9	2.2	—2.3	WSW 9	NE 2	10
Lugansk	1.1	+3.1	+0.7	4.7	+1.2	NNW 4	ENE 1	10

Im Bereich der frischen Polarluft lagen nur Kem und Wologda. In Elatma und Kursk lagerte zwar auch kalte Luft, diese war jedoch, wie aus den Winden hervorgeht, nicht von Norden zugeflossen. Die Abkühlung war in dem südlichen Kursk größer als in Elatma. Dies ist leicht dadurch zu erklären, daß am Vortage in diesem Gebiet die Advektion abnorm warmer Luft erfolgt war. Als nun die Zufuhr warmer Luft aufhörte und sich die in der Nachbarschaft lagernde kalte Luft wieder auszubreiten begann, erfolgte hier infolgedessen die größte Abkühlung. Die thermische Erklärung des Barometeranstiegs macht in beiden Stationen keine Schwierigkeiten. Ein kleiner Teil ist vielleicht nicht thermisch-sekundärer Natur gewesen. Hierauf weist die Erwärmung in Lugansk hin. In den polnischen Stationen sind auch einige Anzeichen vorhanden, die darauf hindeuten, daß noch andere Ursachen bei der Bildung des Steiggebietes mitwirkten als nur die Abkühlung in den untersten Atmosphärenschichten. In Vlotslavsk war das Barometer um 7.1 mm gestiegen, obwohl, wie wir bereits bemerkten, die Advektion kalter Luft erst am 15. mittags erfolgte. Auch in den Stationen, in denen der Einbruch polarer Luft am 15. bereits eingetreten war, läßt sich ein vom Temperaturgange unabhängiges Steigen nachweisen. So erfolgte z. B. in Wilna der Kälteeinbruch in der Nacht vom 14. zum 15., das Barometer begann aber schon in der Nacht vom 13. zum 14. zu steigen. Es ist nicht einzusehen, warum dieses allerdings langsame Steigen, dessen Zusammenhang mit der Temperatur nicht festgestellt werden konnte, mit dem Einbruch der Polarluft beendet sein soll. Es läßt sich doch eher annehmen, daß es noch fortbestand, so daß das Steiggebiet wenigstens zum Teil komplexer Natur war.

Am 16. (Karte 22) hatte sich der Kern des Steiggebietes ohne wesentliche Änderung der Intensität nach Mittelrußland vorgeschoben. Die Kaltluft hatte sich im Osten bis zum Ural ausgebreitet (Wiatka $\Delta p = +12.3$ mm, $\Delta T = -14.5^0$; Perm $\Delta p = +9.3$ mm, $\Delta T = -14.4^0$). In Mittelrußland lag sie noch nördlich des fünfzigsten Breitengrades. Charkow auf 50^0 nördlicher Breite hatte am 15. morgens noch eine Temperatur von $+0.4^0$. Am 16. abends, als der Kälteeinbruch eben erfolgt war, betrug die Temperatur -12.0^0. Es erübrigt sich, für den 16. Februar einen Auszug aus den Extensobeobachtungen mitzuteilen, da der Zusammenhang zwischen dem Steigen des Luftdruckes und dem Kälteeinbruch ziemlich gut war. Dies beweist jedoch nicht, daß die Druckänderung lediglich thermisch bedingt war, sondern nur, daß man aus den Beobachtungen vom 16. Februar eine Abweichung von den Temperaturänderungen in horizontaler Richtung, also ein Nebeneinander von Steiggebieten verschiedener Herkunft nicht nachweisen kann. Und das ist ja das, was wir infolge der Eigenart des benutzten Materials und der Untersuchungsmethode zur Erkenntnis der Natur der Druckschwankungen nur heranziehen können. Fehlt am Erdboden eine Abweichung der Steiggebiete von der Kältewelle, so muß man eine thermisch-sekundäre Erklärung als die wahrscheinlichste annehmen.

Auf der folgenden Isallobarenkarte (Karte 23) liegt das bisher betrachtete Steiggebiet in Westsibirien. In seinem Südteil geht es in ein Barometersteiggebiet über, das schon einige Tage in Zentralasien zu bemerken war. Der Auszug aus den Beobachtungen wird in der nächsten Tabelle gegeben.

Leider werden die Verhältnisse dadurch etwas unklar, daß sich das von Südosten kommende Steiggebiet mit dem von Westen kommenden zu vereinigen beginnt. Infolgedessen bleibt es unsicher, ob sich wirklich das Steiggebiet der Kältewelle oder das von Zentralasien kommende nach Osten weiterbewegte. Zu dem von uns bisher betrachteten Steiggebiet gehören die Stationen Surgut und Omsk

bestimmt, als Randstation kann man vielleicht Barnaul betrachten. In Surgut ist der Temperaturfall vom 16. zum 17. offensichtlich durch Advektion und Ausstrahlung herbeigeführt worden. In Omsk dagegen fehlte die Advektion kalter Luft. Der Temperaturfall war lediglich durch die Ausstrahlung bedingt. Das Tagesmittel hatte sich vom 16. zum 17. kaum verändert. Man kann annehmen, daß sich der Kälteeinbruch über der am Boden lagernden kalten Schicht abgespielt hat. Aber bei der herrschenden Windstille ist dies ziemlich unwahrscheinlich. Der eigentliche Kälteeinbruch erfolgte in Omsk erst am 18. abends. In Barnaul beobachtete man Erwärmung bei leicht steigendem Barometer.

Steiggebiet in Westsibirien und Zentralasien.

	T 17.	ΔT 16./17.	Δp 16./17.	e 17.	Δe 16./17.	Wind 16.	Wind 17.	Bewölkg. 17.
Surgut	−36.6	−20.0	+9.5	0.2	−0.9	SE 2	W 8	1
Omsk	−18.0	− 6.2	+6.6	1.0	−0.7	WSW 3	C	6
Barnaul	−10.6	+ 6.9	+0.7	1.6	+0.6	S 3	W 6	8
Bel. Zimovie	− 9.0	+ 7.4	+4.7	1.9	+0.8	SW 4	C	10
Wernyi	− 5.4	+ 1.0	+9.0	2.7	+0.5	W 1	S 1	10

Die Erwärmung nur durch das Auffrischen der Winde in Anlehnung an eine Arbeit von Schostakowitsch[9]) zu erklären, ist nicht gut möglich, da wir in Barnaul Westwinde beobachteten, die bei der herrschenden Temperaturverteilung und den bisherigen Vorgängen in Rußland Kaltluft bringen müßten. Mehr Stationen als Omsk und Barnaul stehen uns leider in der dortigen Gegend nicht zur Verfügung, oder falls sie vorhanden sind, liegen sie in einem Fallgebiet, wie z. B. Tomsk. Nach dem bisher angeführten erscheint es jedoch am wahrscheinlichsten, daß das von Westen gekommene Steiggebiet nunmehr die Kaltluft verläßt. Die Kaltluft bleibt liegen, das Steiggebiet wandert weiter. Aus dem mitgeteilten Beobachtungsmaterial geht zum mindesten hervor, daß eine ähnliche Übereinstimmung von Steiggebiet und Kältewelle, wie wir sie am 16. fanden, nicht mehr vorhanden ist.

Daß das südliche Steiggebiet nicht in Verbindung mit einer Kältewelle auftrat, zeigen die Werte von Wernyi und Bel. Zimovie.

Das Steigen im europäischen Rußland war auf der Isallobarenkarte vom 16. zum 17. fast verschwunden. Es findet sich nur noch in einem kleinen Gebiet am Schwarzen Meer, wo es allerdings von kräftigem Temperaturfall begleitet war. Im Westen von Rußland war ein Fallgebiet erschienen. Der Kern eines zweiten Fallgebietes lag zwischen dem Kaspischen Meer und dem Ural. Die Front der Kältewelle lief ungefähr vom südlichen Ural nach der Krim.

Zur Erklärung des Steigens am Schwarzen Meer genügen die angegebenen Temperaturänderungen völlig. Sämtliche Stationen weisen jedoch eine bemerkenswerte Eigentümlichkeit auf. Der Druck stieg unmittelbar nach dem Kälteeinbruch kaum, während man doch für gewöhnlich nach der Ankunft der Kaltluft ein stetiges Steigen findet. Am schwarzen Meer setzte der Anstieg erst zwei bis drei Termine nach dem Kälteeinbruch in stärkerem Maße ein. Wenn wir nicht annehmen wollen, daß erst eine sehr seichte Schicht kalter Luft in den Stationen am Schwarzen Meer ankam, so bleibt nur die Annahme einer anfänglichen Kompensation durch Druckfall in der Höhe übrig. Diese letzte Annahme erweist sich nun als sehr fruchtbar, um die Isallobarenkarte vom 18. Februar zu erklären.

Auf dieser Karte (Karte 24) finden wir nämlich zwischem dem Ural und dem schwarzen Meer ein kräftiges Steiggebiet. Nach der vorhergehenden Karte kann der Anstoß zu seiner Bildung nicht durch ein von Westen herangezogenes Steiggebiet veranlaßt worden sein, denn wir fanden am 17. im Westen von Rußland ein Fallgebiet, aber nicht wie bisher in ähnlichen Fällen ein Steiggebiet. Ein Steiggebiet lag am 17. nur am Schwarzen Meer. Also kann, falls überhaupt der Anstoß zur Bildung des russischen Steiggebietes von außen kam, dieser nur als ein von Südwesten über das Schwarze Meer gewandertes System von Fall- und Steiggebiet angenommen werden. Der Kälteeinbruch am Schwarzen Meer vollzog sich also im Anfang in dem von SW herangewanderten Fallgebiet, während der Übergang zum Steigen an der Erdoberfläche nicht die Ankunft einer höher reichenden Schicht kalter Luft, sondern die Ankunft des dem Fallgebiet von Südwesten folgenden Steiggebietes darstellte. Daß die Annahme eines von SW gekommenen Steiggebietes richtig ist, geht aus den Hoffmeyerschen Wetterkarten hervor. Diese zeigen nämlich, daß vom Mittelländischen Meer eine Depression nach Rußland zog. Auf ihrer Rückseite ging die weitere Ausbreitung kalter Luft nach Osten vor sich.

Wir geben einige Daten für das Steigen am 18. Februar.

Steiggebiet in Zentralrußland.

	T 18.	ΔT 17./18.	Δp 17./18.	e 18.	Δe 17./18.	Wind 17.	Wind 18.	Bewölkg. 18.
Wiatka	—35.8	— 9.1	+ 8.6	0.2	—0.2	N 4	NW 2	0
Uralsk	—21.2	—14.4	+17.5	0.6	—1.9	SSE 13	NNE 3	10
Astrachan	— 8.1	— 9.2	+ 5.2	2.1	—2.6	S 4	NE 8	10
Uspenskaja	—26.1	+ 6.1	+ 5.0	0.5	+0.3	NW 4	WSW 5	3

In Uralsk und in Astrachan ist der Kälteeinbruch erfolgt. Die thermische Erklärung des Steigens bietet keine Schwierigkeit. In Wiatka dagegen ist die Temperaturerniedrigung vermutlich größenteils auf Ausstrahlung zurückzuführen. In Uspenskaja ist deutliche Erwärmung eingetreten. Man wird aber aus den Verhältnissen an diesen beiden Stationen nicht ohne weiteres auf nicht troposphärische Ursachen schließen dürfen, denn beide haben relativ zur Front der Kältewelle eine solche Lage, die mit großer Wahrscheinlichkeit zwar ein Höherwerden der Kaltluft über dem Beobachtungsort, aber auch gestörte Verhältnisse an der Erdoberfläche erwarten läßt. Bei den in Verbindung mit den russischen Kältewellen auftretenden Steiggebieten findet man ähnliche Verhältnisse fast regelmäßig. Temperaturfall und Druckanstieg treten nur unmittelbar hinter der Front der Kältewelle verbunden auf. Die nördlichen und westlichen Stationen eines mit der Kältewelle in Zusammenhang stehenden Steiggebietes weisen meist Temperaturanstieg oder sehr tiefe, aber wenig veränderte Ausstrahlungstemperaturen auf. Hieraus auf ein primäres Bedingtsein dieser Teile eines Steiggebietes zu schließen, ist nicht statthaft. Die in dieser Untersuchung angewandten Methoden geben uns keinen sicheren Anhalt für die Entscheidung dieser Frage. Wir sind, einige wenige Fälle ausgenommen, gezwungen, uns nur mit den in der Umgebung der Front der Kältewelle sich abspielenden Vorgängen zu befassen.

Das Steiggebiet, das wir bei seiner Wanderung durch Rußland verfolgt hatten, lag am 18. Februar bereits am Jenissei. Auf den von uns gezeichneten Karten ist nur noch sein westlicher Teil vorhanden.

Steiggebiet in Sibirien.

	T 18.	ΔT 17./18.	Δp 17./18.	e 18.	Δe 17./18.	Wind 17.	Wind 18.	Bewölkg. 18.
Tomsk	— 8.7	+2.1	+ 6.7	2.1	+0.4	SW 4	S 8	10
Kansk	—13.3	—7.8	+15.9	1.2	—1.1	SE 2	0	10

Vergleicht man die Werte dieser Stationen mit denen von Surgut und Omsk, wie wir sie in der Tabelle für den 17. Februar anführten, so wird ersichtlich, daß sich das Steiggebiet von der über Rußland liegenden Kaltluftmasse abgetrennt hat. Für einen wirklichen von Westen kommenden Kälteeinbruch liegen die Temperaturen in beiden Stationen viel zu hoch. Da der Kälteeinbruch im westlichen Omsk erst am 18. abends erfolgte, können wir auch nicht annehmen, daß die Kaltluft am 17. bereits in Kansk eingetroffen sei. Trotzdem ist die starke Drucksteigerung in Kansk wohl teilweise auf Abkühlung in den unteren Schichten zurückzuführen, zum Teil ist sie aber auch primären Ursprungs. Nun legt ja die westöstliche Wanderung des Barometeranstiegs in Rußland von vornherein nahe, daß wir in dem betrachteten Steiggebiet z. T. primäre Ursachen annehmen müssen. In Sibirien verläßt das Steiggebiet die Kältewelle. Da jedoch gleichzeitig noch ein Steiggebiet von Südwesten heranwanderte, ist es zunächst besonders bei dem Mangel an Beobachtungsstationen nicht sicher, welches von den beiden Steiggebieten beobachtet wurde. Daß wenigstens ein Teil des Steiggebietes von Westen herangewandert ist, geht jedoch daraus hervor, daß bei den ungefähr auf demselben Längengrade liegenden Stationen Tomsk, Barnaul und Belagatschkoe Zimovie eine gewisse Verschiedenheit des Druckanstiegs, wie man sie erwarten müßte, wenn der Barometeranstieg von Südwesten herangewandert wäre, nicht zu konstatieren ist. In allen drei Stationen begann der Druckanstieg nach dem Abendtermin des 16. Februar und dauerte bis zum Abendtermin des 17., wo der höchste Luftdruck während des Vorüberziehens dieses Steiggebietes gemessen wurde. Der totale Druckanstieg, also die Differenz zwischen dem höchsten und tiefsten Barometerstand, betrug in Tomsk 13.9, in Barnaul 13.3, in Bel. Zimovie 10.6 Millimeter; eine von Süden nach Norden gerichtete Abnahme, wie man sie als

sehr wahrscheinlich annehmen müßte, wenn das Steiggebiet des 18. ausschließlich auf das am Vortage in Zentralasien gelegene zurückzuführen wäre, ist nicht vorhanden.

Zusammenfassend können wir sagen, daß das Steigen am oberen Jenissei wenigstens teilweise als Fortsetzung des vom 14. an durch Rußland gewanderten Steiggebietes zu betrachten ist. Das Steiggebiet ist von Westen nach Osten über die Kaltluft hingewandert und hat sie in Westsibirien verlassen. Diese Unabhängigkeit beider hinsichtlich ihrer ganzen Fortpflanzung läßt einen allein auf die Kaltluft beschränkten Vorgang als unmöglich erscheinen.

Auf der Isallobarenkarte vom 18. zum 19. Februar 1900 (Karte 25) ist das am 18. im Osten noch angedeutete Steigen verschwunden. Das einheitliche, am 18. im europäischen Rußland gelegene Steiggebiet ist jedoch in zwei Kerne zerfallen. Wir werden sie getrennt untersuchen.

Steigen in Südrußland und am Kaspischen Meer.

	T 19.	ΔT 18./19.	Δp 18./19.	e 19.	Δe 18./19.	Wind 18.	Wind 19.	Bewölkg. 19.
Elatma	−31.4	− 4.4	+5.1	0.3	−0.1	NW 1	C	0
Lugansk	−10.4	+ 2.6	+8.4	1.6	+0.3	ENE 3	E 3	10
Astrachan	−17.4	− 9.3	+6.7	1.0	−1.1	NE 8	N 6	0
Stavropol	−10.3	−11.5	+8.4	1.9	−3.1	WNW 4	SE 3	10
Gudaur (2204 m)	− 5.7	− 4.0	+2.3	2.5	±0	ESE 1	NNW 1	8

Da die Abkühlung bereits Gudaur erreicht hat, ist eine thermische Ursache für das Steigen am Schwarzen und Kaspischen Meer als sehr wahrscheinlich anzunehmen. In Mittelrußland sind die Verhältnisse weniger einfach. Der Barometeranstieg erfolgte dort teils mit Abkühlung, die aber durch Ausstrahlung, wie z. B. in Elatma, erklärt werden kann, teils bei geringer Erwärmung. Eine nicht troposphärische Bedingtheit des Steigens scheint infolgedessen nicht von der Hand zu weisen zu sein. Da jedoch ganz Mittelrußland von kalter Luft bedeckt ist, kann man mit der gleichen Berechtigung annehmen, daß sich das erneute Zufließen kalter Luft nur in höheren Troposphärenschichten bemerkbar machte, während am Boden kaum eine Änderung der herrschenden Verhältnisse eintrat. Den Zufluß kalter Luft braucht man nicht als eigentliche Kältewelle aufzufassen, sondern man könnte annehmen, daß die von Norden nach Süden geneigte Grenzfläche kalter Luft überall infolge des Vordringens kalter Luft im Süden sich um ein gewisses Stück meridional nach Süden bewegt habe. Über einem fixen Punkt der Erdoberfläche würde dann die obere Begrenzung der über ihm lagernden Kaltluft gehoben, was sich in einer Drucksteigerung am Erdboden bemerkbar machen muß. Diese Auffassung stimmt insofern mit den Beobachtungen überein, als man in dem westlichen Gebiet ein sehr gleichmäßiges Steigen des Barometers um 5—8 mm beobachtete. Dies müßte auch eintreten, wenn sich die Grenzfläche parallel zu sich selbst um einen gewissen Betrag nach Süden bewegt.

Der andere Kern des Steiggebietes vom 19. Februar lag zwischen dem Ural und dem mittleren Ob in Westsibirien. Das Barometer war kräftig gestiegen.

Steigen des Barometers in Westsibirien.

	T 19.	ΔT 18./19.	Δp 18./19.	e 19.	Δe 18./19.	Wind 18.	Wind 19.	Bewölkg. 19.
Bogoslovsk	−28.5	+ 2.4	+10.4	0.4	+0.1	C	W 3	0
Jekaterinburg	−28.6	− 4.2	+13.0	0.4	−0.1	W 10	WNW 2	0
Surgut	−34.2	− 8.6	+23.5	0.2	−0.3	NE 10	SW 2	1
Omsk	−20.6	−15.8	+17.4	0.7	−2.2	WSW 14	C	10
Tomsk	−16.7	− 8.0	+ 5.8	1.0	−1.1	S 8	WSW 3	10
Barnaul	− 4.0	+ 1.7	+ 2.5	2.9	+0.5	SSW 9	C	10

Die ersten drei Stationen lagen im Bereich der Polarluft. Dies sieht man besonders gut, wenn man die Temperatur- und Dampfdruckänderungen an diesen Stationen mit den in Omsk eingetretenen vergleicht. Eine einwandfreie Erklärung des Druckanstiegs kann man aus den Verhältnissen am Erdboden bei eingehenderer Betrachtung nicht gewinnen. Die Beobachtungen in Omsk würden einer thermischen Erklärung des Steigens an dieser Station die größte Berechtigung geben. In Tomsk ist zwar auch eine Kältewelle zu konstatieren, sie leitete aber nicht, wie in Omsk, den Druckanstieg ein, sondern folgte ihm um einen Termin nach. In Barnaul ist keinerlei Anzeichen für einen Kälteeinbruch

oder die Advektion kalter Luft von irgend einer Seite vorhanden. Trotzdem ist dort unter dem Einfluß des vorüberziehenden Steiggebietes ein totaler (nicht 24stündiger) Druckanstieg von 6.3 mm eingetreten. Wir können also zum mindesten daran zweifeln, daß wir die Ursachen dieses Steiggebietes lediglich in der Advektion kalter Luft in den unteren troposphärischen Schichten zu suchen haben.

Dieses Steiggebiet durch die Advektion kalter Luft in den unteren Schichten der Atmosphäre zu erklären, erscheint auch durch die folgende Überlegung ziemlich unwahrscheinlich. Nehmen wir eine troposphärische Bedingtheit des Steigens an, so müssen wir uns seine Ursache als das plötzliche Vordringen einer anfangs über der Erdoberfläche in Ruhe befindlichen Kaltluftmasse vorstellen. Das Anwachsen der Kaltluftmasse über einem bestimmten Ort und damit auch das Vordringen in horizontaler Richtung muß schnell vor sich gegangen sein, um den beobachteten beträchtlichen Druckanstieg zu erklären. Nach den beobachteten Winden zu schließen, muß sich bei diesem Kälteeinbruch die Kaltluft vorwiegend nach Osten bewegen. Nun zeigen aber gerade die östlichen Stationen Tomsk und Barnaul nur geringe oder gar keine Merkmale eines Kälteeinbruches. Daß sich der Kälteeinbruch völlig nach NE gewandt hat, steht mit den bisherigen Erfahrungen im Widerspruch. Beschränken wir uns jedoch darauf, die am Erdboden eingetretene Abkühlung als die Advektion einer seichten Schicht kalter Luft aufzufassen und erklären den Hauptteil des Steigens durch Vorgänge in höheren Schichten, so fallen alle Schwierigkeiten weg. Von der niedrigen Kaltluftmasse kann man annehmen, daß sie nicht die potentielle Energie besaß, um ohne günstige Druckänderungen größere Flächen zu überfluten. Der Druckanstieg in Barnaul ist einfach zu erklären, ebenso der kräftige in Surgut und Omsk, nämlich durch das Zusammenwirken hoher und niedriger Vorgänge, bezw. das Fehlen einer Kältewelle und die alleinige Wirkung hoher Vorgänge (Barnaul).

Was weiterhin eine niedrig-troposphärische Erklärung des westlichen Steiggebietes gar nicht darzulegen vermag, ist die Verwandlung der Isallobarenkarte vom 18. in die vom 19. und der vom 19. in die vom 20., die wir aber nicht mehr angeführt haben. Diese Umwandlung ist eigentlich das Interessanteste an den besprochenen Isallobarenkarten, erst in zweiter Linie kommen die in den Steiggebieten auftretenden Veränderungen der meteorologischen Elemente. Sehen wir von dem Steigen in Sibirien ab, so haben wir am 18. Februar 1900 nur ein einziges Steiggebiet auf der Isallobarenkarte. Es liegt hinter der Front der im Vorrücken begriffenen Kältewelle und würde ohne alles Weitere vermuten lassen, daß wir einen typischen Fall für das Auftreten von nur einem Steiggebiet bei der Kältewelle vor uns hätten. Auch die Beobachtungen an den einzelnen Stationen geben uns keinen sicheren Anhalt dafür, daß wir es nicht mit einem auf einheitlichen Ursachen beruhenden Steiggebiet zu tun hätten. Aus dem einheitlichen Steiggebiet sind am nächsten Tage (19. II.) zwei geworden. Das südliche Steiggebiet hat mit dem ursprünglichen Steiggebiet die Kältewelle, das nördliche die Form der Isallobaren und den kräftigen Druckanstieg gemein. Auf der Isallobarenkarte vom 20. Februar ist das nördliche Steiggebiet verschwunden. Es kann nur nach Nordosten abgewandert sein, da es sich im Kartenbild nicht mehr auffinden läßt. Der südliche, mit der Kältewelle verbundene Teil ist mit der Kältewelle nach Zentralasien gewandert und noch tagelang nachweisbar. Hätte das nördliche Steiggebiet eine ähnliche Ursache wie das südliche, so wäre sein vollständig anders geartetes Verhalten gar nicht zu verstehen. Verbinden wir die verschiedenen Zentren des mit den konzentrischen Isallobaren auftretenden Steiggebietes auf den Karten aufeinanderfolgender Tage, so werden wir dazu geführt, daß das Steiggebiet vom Mittelmeer über das Schwarze Meer durch Rußland nach Nordosten gewandert ist. Durch Betrachtung der Hoffmeyerschen Karten fanden wir bereits, daß auf derselben Zugstraße zu derselben Zeit eine Depression zog. Da diese längst im östlichen Mittelmeer vorhanden war, als die Kaltluft noch in Mittelrußland lagerte, so ist damit die Unabhängigkeit des Steiggebietes von der Kältewelle und im weiteren auch von dem Zufluß polarer Luft überhaupt bewiesen.

Die Untersuchung der Isallobarenkarten vom 14.—19. Februar 1900 hatte uns zu dem Ergebnis geführt, daß wir neben dem durch die Bewegung der Kaltluft hervorgerufenen Steigen noch zwei weitere Steiggebiete des Luftdruckes fanden, deren Bedingtheit durch einen troposphärischen Kälteeinbruch nicht bewiesen oder wahrscheinlich gemacht werden konnte. Das erste dieser Steiggebiete zog von Westen nach Osten über die Kaltluftmasse hin, während das zweite von Südwesten nach Nordosten durch Rußland zog. Diese Zugrichtungen stimmen auffällig mit der Lage der Kalt- und Polarfront in den betreffenden Tagen überein. Dies legt die Annahme nahe, daß zwischen beiden ein gewisser Zusammenhang besteht. Die Erscheinung beobachtet man auch im europäischen Rußland, indem sich mit der Südwärtsverlagerung der Kälte auch eine südliche Verschiebung der Bahnen der Steiggebiete zeigte. Etwas Ähnliches ist bereits früher von W. Peppler[8]) bemerkt worden. Er erklärte

es vor einigen Jahren als eine erste Andeutung der Bjerknesschen Zyklonenfamilien. Daß eine solche Erklärung aber in Rußland nicht zutrifft, haben wir bereits ausführlich gezeigt; die Ursachen dieser Erscheinung müssen wir wahrscheinlich darin suchen, daß zwischen den Vorgängen in niedrigen und hohen Schichten der Atmosphäre doch irgendeine Wechselbeziehung besteht, so daß zwar die kurzperiodischen Schwankungen in der Höhe als unabhängig von solchen in der Niederung betrachtet werden können, daß dies aber nicht ohne weiteres für anders geartete Vorgänge gilt. Ob in unserem Falle die hohen Vorgänge die Wanderung und Lage der Kaltluftmasse in großen Zügen bestimmten, oder ob diese gewisse Vorgänge in höheren Schichten erst hervorrief, kann natürlich ohne eingehende Untersuchung nicht gesagt werden. Wenn wir zwar zeigen konnten, daß die kurzperiodischen, auf hohen Vorgängen beruhenden Schwankungen meist erst den Kaltluftvorstoß an der Erdoberfläche hervorriefen, so berechtigt dieses jedoch keineswegs dazu, ein ähnliches Kausalitätsverhältnis ohne weiteres auch für langperiodische oder anders geartete Vorgänge in der Höhe und der Niederung anzunehmen.

Wir führen noch kurz ein Beispiel für den Wechsel von Steiggebieten hinter einer Kältewelle an.

9. bis 12. Mai 1900. Die Kältewelle und das Steiggebiet erschienen zur gleichen Zeit im Nordwesten von Rußland. Am 10. Mai war das Steiggebiet nach Osten weitergewandert und bedeckte das Gebiet zwischen dem Unterlauf des Ob und Nordskandinavien. Der größte Teil der von ihm umfaßten Stationen zeigte kräftige Abkühlung. Daß wir es aber nicht nur mit Advektion einer Kaltluftmasse zu tun haben, die bei ihrer Wanderung das Steigen bewirkte, geht aus der Isallobarenkarte vom 10. zum 11. Mai hervor. Hier trat der in Westsibirien liegende südliche Teil des Steiggebietes durchweg mit Erwärmung auf. Auf der Isallobarenkarte vom 12. Mai war noch ein schwaches Steigen in Westsibirien angedeutet, wahrscheinlich der letzte Rest des von Nordskandinavien nach Osten gewanderten Steiggebietes. Bei seinem Zug durch Rußland ist kalte Luft bis zum 55. Breitengrade nach Süden geschafft worden. Sie muß noch ziemlich hoch gewesen sein, da von hieraus der Kälteeinbruch nach Südrußland erfolgte. Wäre die Hauptmasse der kalten Luft mit dem ersten Steiggebiet nach Osten gewandert, so wäre kaum zu erklären, woher die nach Südrußland und am 14. auch nach Westsibirien gewanderten Kaltluftmassen stammten. Das Steiggebiet, das in Südrußland in Verbindung mit der Kältewelle erschien, war am 10. im äußersten Westen der Karte angedeutet und wanderte, zeitweilig durch die Bewegung der Kaltluft mit seinem Kern gegen das Schwarze Meer oder nach Norden verlagert, nach Osten. Bei seiner Ankunft in Westsibirien löste es die nach dem Inneren von Sibirien wandernde Kältewelle aus.

Es erübrigt sich, noch weitere Beispiele hierfür anzuführen, da bereits bei der Behandlung der Steiggebiete, die beim Auftreten der Kältewellen vorhanden waren, einige Fälle erwähnt wurden, in denen das anfangs mit der Kaltluft verbundene Steiggebiet nach Osten davonzog, während ein neues Steiggebiet von Westen heranrückte und nun erst den eigentlichen Kälteeinbruch nach dem mittleren Rußland verursachte. Diese Fälle mögen auch noch als Beispiel für diesen Abschnitt gelten.

Wenn auch die sich dem eigentlichen Steiggebiet der Kältewelle überlagernden Steiggebiete in der Regel von Westen nach Osten zogen, so kommen doch auch andere Zugrichtungen vor. Eine nach Nordosten gerichtete Zugstraße hatten wir in unserem ausführlich behandelten Beispiel kennen gelernt. Es kommt auch vor, daß das nicht niedrig-troposphärische Steiggebiet fast von Süden nach Norden durch Zentralasien und Westsibirien zieht. Wenn auch diese Fälle meist etwas komplizierter sind wie die mit westöstlicher Zugrichtung der isallobarischen Gebilde, so ergab ihre Untersuchung doch keine wesentlich neuen Gesichtspunkte hinsichtlich des Zustandekommens der Druckschwankungen.

Der im vorhergehenden behandelte Typus von Isallobarenkarten stellt wohl die interessantesten Verhältnisse dar, die bei den Steiggebieten der russischen Kältewellen beobachtet wurden. Denn diese Karten zeigen uns das Paradoxon, daß das Steiggebiet einer Kältewelle von Westen nach Osten wandert, während sich die Kaltluft von Norden nach Süden ausbreitet. Daß es sich bei dieser eigentümlichen Wanderung der Steiggebiete nicht um eine Verdoppelung von Kaltluftmassen, die unter dem Einfluß konstanter Westwinde im Umkreis der Kaltluft entstand, handeln kann, geht aus dem Auftreten und Verschwinden der Steiggebiete schon zur Genüge hervor. Es wäre auch unmöglich, den beobachteten Zerfall eines Steiggebietes in zwei völlig anders geartete hiermit zu erklären; dies gelang jedoch einfach, indem man eine Superposition von Steiggebieten annahm. Und zwar genügten immer nur zwei Arten von Steiggebieten. Das eine konnte hinsichtlich seiner Begrenzung jederzeit durch die Verschiebung der Polarfront festgelegt werden. Der andere Teil trat zunächst nur als Differenz dieses

Teiles und des aus den Beobachtungen ermittelten Steiggebietes auf. Die Verfolgung dieses nicht durch eine Kältewelle bedingten Teiles auf den aufeinanderfolgenden Karten zeigte uns, daß er seine Besonderheiten in Druckanstieg und Zugrichtung beibehielt. Damit war erwiesen, daß wir ihn als durchaus gleichberechtigt neben das allein durch die Advektion kalter Luft an der Erdoberfläche entstandene Steiggebiet zu setzen haben, daß er ebenso real ist wie dieses. Es scheint uns auch das Ergebnis nicht ohne Wert zu sein, daß eine Superposition von nur zwei Arten von Steiggebieten jederzeit genügte, um eine befriedigende Annäherung an die wirklichen Verhältnisse zu bekommen. Dies läßt darauf schließen, daß außer den unteren Troposphärenschichten nur noch ein Niveau vorhanden ist, in dem die Ursachen der interdiurnen Druckänderungen liegen können.

Beim Niederschreiben dieser Zeilen erschien ein Aufsatz von W. König: „Über die Erschließung hoher Druckwellen durch Änderungskarten“ [7]). Es interessierte besonders, daß auch König durch Vergleich der Änderungskarten und der Fronten dazu geführt wurde, teils eine Unabhängigkeit beider, teils eine Abhängigkeit der Bewegung der Fronten von den Isallobarengebilden anzunehmen. Da diese Erkenntnisse im wesentlichen an den mittel- und westeuropäischen Verhältnissen gewonnen wurden, so kann darin im Hinblick auf die Ergebnisse dieser Arbeit eine Bestätigung dessen erblickt werden, was von vornherein zu erwarten war, nämlich daß unsere Erklärung der Verhältnisse bei den russischen Kältewellen nicht bloß eine auf Rußland beschränke Gültigkeit hat, sondern daß sie sich unter entsprechender Modifizierung auch auf europäische Verhältnisse übertragen lassen kann. Jedoch muß man bedenken, daß die in dieser Arbeit benutzte Methode nicht nur das Zeichnen von Isallobarenkarten, sondern auch das von Fronten verlangt. Denn erst durch die Subtraktion des Druckeffektes der „Fronten“ erhalten wir den von niedrig-troposphärischen Veränderungen unabhängigen Bestandteil der Bodendruckänderungen. Das Zeichnen von Fronten ist in Europa zwar sehr viel schwieriger durchzuführen, aber auch andererseits zur Erkennung der Druckänderungen nicht so notwendig wie in Rußland.

2. Die Kältewelle teilte sich in verschiedene Teile.

Es war von vornherein zu erwarten, daß sich aus den Fällen, bei denen eine einheitliche Kaltluftmasse im Gefolge mit mehreren Steiggebieten auftrat, eine bessere Einsicht in die Ursachen der Druckänderungen gewinnen ließ als aus den Fällen, in denen sich die Kältewelle teilte. Denn im zweiten Fall ist das Auftreten verschiedener Steiggebiete schon durch die troposphärischen Vorgänge gegeben, während im ersten Fall ein gewisser Widerspruch vorhanden ist, wenn man sich nur auf niedrig-troposphärische Vorgänge beschränkt. Aus diesem Grunde behandeln wir die Teilung der Kältewellen erst in zweiter Linie, obwohl aus dynamischen Gründen vielleicht eine Behandlung an erster Stelle hätte gefordert werden können. Dies Kapitel noch weiter zu unterteilen, etwa nach den Gegenden, in denen sich die Teilung vollzog, oder nach der Zugrichtung der losgelösten Kaltluftmassen, ist nicht zweckmäßig, da die zur Verfügung stehenden Fälle nicht sehr häufig sind. Wir wollen die eingehendere Betrachtung bei einer Kältewelle durchführen, die sich in verhältnismäßig viele Teilwellen zerspalten hat und bei der auch in der Zugrichtung der Teilwellen eine Abweichung von dem gewöhnlichen Verhalten größerer Wellen zu konstatieren ist.

8. bis 15. Februar 1898 (Karte 26—33). Die Isallobarenkarte vom 7. zum 8. Februar (Karte 26) zeigt noch eine geschlossene Kaltluftmasse. Sie war rasch von Norden her nach Mittelrußland vorgestoßen. Das sie begleitende Steiggebiet ragte über sie hinaus nach Süden und war mit einem in Zentralasien liegenden schwachen Steiggebiet verbunden.

Steiggebiet im europäischen Rußland.

	T 8.	ΔT 7./8.	Δp 7./8.	e 8.	Δe 7./8.	Wind 7.	Wind 8.	Bewölkg. 8.
Kargopol	—30.6	—13.0	+9.3	0.3	—0.6	N 5	N 1	0
Elatma	—14.1	—10.7	+9.3	1.4	—1.8	NW 9	SW 3	0
Lugansk	— 7.5	— 9.2	+7.7	2.4	—2.3	W 4	C	0
Gudaur (2204 m) . .	— 3.1	+ 1.4	—1.1	2.4	+0.1	ENE 3	NNE 3	3

Die Polarluft war noch nicht nach Lugansk gelangt. Dies geht aus den Winden hervor. Es wurden an den Terminen höchstens WNW-Winde beobachtet, aber nie Nordwinde, die nach dem ganzen Vordringen der Polarluft hätten beobachtet werden müssen, wenn sie schon bis Südrußland

gelangt wäre. Trotzdem ist eine thermische Erklärung für das Steigen in Lugansk durchaus gerechtfertigt. Auf ein troposphärisch bedingtes Steigen deutet auch der Umstand, daß in Gudaur, das noch im südlichen Teil des Steiggebietes liegt, Druckfall beobachtet wurde.

Steigen in Zentralasien.

	T 8.	ΔT 7./8.	Δp 7./8.	e 8.	Δe 7./8.	Wind 7.	Wind 8.	Bewölkg. 8.
Kasalinsk	−10.4	+0.4	+3.7	1.7	0.0	C	NNW 3	10
Aschabad	1.9	−1.7	+3.1	5.0	−0.1	WNW 4	C	10
Samarkand	0.9	−2.0	+2.6	4.8	+0.9	S 1	W 1	10

Vom 7. zum 8. war an den meisten Stationen Abkühlung nach einer Periode abnorm hoher Temperatur eingetreten. Sie machte sich weniger in einer Senkung der Morgentemperaturen als in einer der Mittagstemperaturen bemerkbar. Dies kann größtenteils auf den Übergang von völlig heiterem zu bedecktem Wetter geschoben werden. Die an den einzelnen Stationen eingetretene geringe Abkühlung wird man nicht als das Anzeichen eines allgemeinen, in Verbindung mit diesem Steiggebiet erfolgenden Kaltlufteinbruches bezeichnen können. Temperatur und Dampfdruck liegen in den südlichen Stationen für einen winterlichen Kälteeinbruch viel zu hoch. Man hat den Eindruck, daß das Steigen des Barometers mit keinem Vorgang am Erdboden enger verknüpft war. Eine Stütze erfährt diese Anschauung auch dadurch, daß an den vorhergehenden Tagen in Gudaur Druckanstieg herrschte, ohne daß sich die Temperatur wesentlich geändert hätte. Nach den bisherigen Erfahrungen und nach den Isallobarenkarten muß man aber annehmen, daß das im westlichen Zentralasien liegende Steiggebiet über den Kaukasus hingezogen ist. Es ist also weder an eine Abkühlung am Erdboden noch in 2000 m Höhe geknüpft gewesen.

Am 9. Februar (Karte 27) hatte sich die Teilung der Kaltluftmasse vollzogen. Der eine Flügel lag an der Ostsee, der andere in Westsibirien. Der Zweiteilung der Kaltluftmasse entsprechen die zwei Gebiete stärksten Barometeranstiegs, die allerdings voneinander stark verschieden sind.

Westliches Steiggebiet.

	T 9.	ΔT 8./9.	Δp 8./9.	e 9.	Δe 8./9.	Wind 8.	Wind 9.	Bewölkg. 9.
Libau	−1.2	−1.6	+5.4	4.2	−0.5	SW 2	E 1	9
Vlotslavsk	−0.7	+3.0	+2.3	4.2	+0.8	SSW 2	SW 1	10

In Libau ist der Zufluß kalter Luft bereits deutlich zu erkennen. Vom 9. morgens an fiel der Dampfdruck anhaltend. In Vlotslavsk dagegen haben wir sowohl vom 8. zum 9. wie auch während der drei Terminablesungen am 9. Februar noch keine Andeutung der Ankunft polarer Luft. Wir müssen auf eine komplexe Natur dieses Steiggebietes schließen.

Steiggebiet am Ural und in Zentralasien.

	T 9.	ΔT 8./9.	Δp 8./9.	e 9.	Δe 8./9.	Wind 8.	Wind 9.	Bewölkg. 9.
Perm	−20.1	−16.0	+16.1	0.7	−2.3	W 6	W 4	8
Orenburg	−16.8	−15.6	+13.9	1.1	−2.9	W 3	C	0
Kasalinsk	− 5.7	+ 4.7	+ 5.1	2.5	+0.8	NNW 3	N 3	10
Taschkent	− 0.7	− 1.6	+ 5.2	4.4	+1.5	N 2	E 1	10

Der Unterschied zwischen den beiden nördlichen und den beiden südlichen Stationen ist sehr groß. Es ist ganz ausgeschlossen, eine Drucksteigerung in Zentralasien infolge des Vorüberzuges einer Kältewelle anzunehmen. Wäre sie nämlich von Norden gekommen, was in Zentralasien selten ist, so könnte sie unmöglich Erwärmung gebracht haben und einen so hohen Dampfdruck besitzen, handelte es sich aber um eine in den unteren Schichten angeheizte Luftmasse anderer Herkunft, so müßten zum mindesten einheitliche Windrichtungen beobachtet worden sein. Wenn wir es auf Grund der Isallobarenkarte vom 7. zum 8. für wahrscheinlich hielten, daß das durch Zentralasien ziehende Steig-

gebiet nicht den Druckeffekt von Kaltluftmassen darstellte, die in den unteren Atmosphärenschichten herangewandert waren, so können wir dies auf Grund der Feststellungen an der Isallobarenkarte vom 8. zum 9. als sicher annehmen.

Auf der Karte vom 9. zum 10. Februar (Karte 28) wird Rußland mit Ausnahme eines von Mittelrußland nach Zentralasien sich ausdehnenden Fallgebietes von Barometeranstieg bedeckt. Die zwei Teile der Kältewelle liegen in Westrußland und Westsibirien. Ihnen entsprechen zwei Zentren stärksten Barometeranstiegs, von denen der östlichste sich unerwartet weit nach Nordwesten ausgedehnt hat.

Westliches Steiggebiet.

	T 10.	ΔT 9./10.	Δp 9./10.	e 10.	Δe 9./10.	Wind 9.	Wind 10.	Bewölkg. 10.
Petersburg	−12.3	+3.1	+ 7.5	1.5	+0.4	ENE 3	NE 4	10
Libau	− 7.4	−6.2	+12.2	2.3	−1.9	E 1	E 2	10
Vlotslavsk	− 1.6	−0.9	+10.4	3.3	−0.9	SW 1	N 3	10

In Libau und Vlotslavsk liegt ein Kälteeinbruch offen zu Tage. In Petersburg dagegen ist für die Erklärung des Druckanstiegs aus den Bodenbeobachtungen keine Handhabe zu gewinnen. Zunächst erscheint der Zerfall des Steiggebietes in zwei Kerne, der am 11. zu beobachten ist, darauf hinzuweisen, daß wir im westlichen Rußland zwei Steiggebiete beobachteten, von denen das eine, an die vorrückende Kaltluftmasse geknüpft, von Norden nach Süden zog, während das andere von Süden nach Norden, also in entgegengesetzter Richtung wanderte. Das verhältnismäßig kräftige Steigen am 10. wäre durch die Superposition beider Steiggebiete zu erklären. Da wir das von Süden kommende Steiggebiet als „primäres“ ansehen müssen, worauf auch die bei der vorigen Karte gemachten Bemerkungen hinweisen, so wäre es natürlich sehr günstig, wenn der nördliche Kern am 11. Temperaturanstieg aufweisen würde. Dies ist jedoch nicht der Fall gewesen. In Petersburg als der einzigen Station dieses Steiggebietes war am 11. Abkühlung eingetreten. Infolgedessen kann man diese als die Ursache des Druckanstiegs vom 10. zum 11. ansehen. Dies beweist jedoch nicht, daß die Annahme zweier getrennter Steiggebiete im westlichen Rußland falsch ist. Die Annahme einer schwachen Westkomponente in der Zugrichtung des primären Steiggebietes oder eine raschere Wanderung nach Norden würde mit den Beobachtungen in Petersburg nicht in Widerspruch geraten. Da wir die Druckänderungen von Skandinavien nicht ausgerechnet haben, können wir nicht nachprüfen, ob eine etwas nach Westen gerichtete Verlagerung wirklich eingetreten ist. Durch die verhältnismäßig rasche südnördliche Wanderung eines primären Steiggebietes würde zugleich das unvermittelte Auftreten eines kräftigen Barometeranstiegs an der Eismeerküste, den wir vom 10. an beobachten können, erklärt werden.

Steigen in Westsibirien.

	T 10.	ΔT 9./10.	Δp 9./10.	e 10.	Δe 9./10.	Wind 9.	Wind 10.	Bewölkg. 10.
Obdorsk	−26.0	+ 4.8	+10.7	0.5	+0.2	W 6	SW 6	10
Surgut	−34.2	−18.4	+19.1	0.2	−0.8	WNW 8	WSW 4	0
Jekaterinburg	−19.5	− 4.5	+10.4	0.8	−0.3	W 13	S 1	10
Omsk	−23.8	−20.6	+ 7.0	—	—	W 3	W 1	1
Tomsk	−12.8	− 4.0	+ 5.5	1.3	−0.4	S 6	WSW 4	10
Barnaul	−13.7	+ 0.2	+ 6.1	1.4	+0.1	S 2	C	9
Bel. Zimovie	− 7.9	− 0.5	+ 5.8	2.1	+0.7	S 4	C	10

Obdorsk zeigt ähnliche Verhältnisse, wie sie auch an der europäischen Eismeerküste herrschten. Es erfolgte dort nämlich ein Steigen des Barometers um 10 bis 17 mm teils bei Abkühlung, teils bei Erwärmung. Die Winde wiesen fast alle eine Südkomponente in ihrer Richtung auf. Advektion an der Erdoberfläche war jedenfalls nicht mit dem Steigen am Eismeer verbunden. Man kann ein Höherwerden der Kaltluft annehmen, wodurch die drucksteigernde Abkühlung in die mittlere Troposphäre verlegt würde. Diesem troposphärisch bedingten Luftdruckanstieg hat sich vielleicht das primäre, rasch durch Westrußland gewanderte Steiggebiet überlagert, dessen Vorhandensein wir nach den dort beobachteten Verhältnissen als sehr wahrscheinlich angenommen haben.

Verhältnismäßig einfach liegen die Verhältnisse bei den vier nächsten Stationen der vorstehenden Tabelle. In ihnen ist ein Kälteeinbruch erfolgt. Während in Omsk und Surgut Kälteeinbruch und Ausstrahlung vereint zu kräftiger Abkühlung geführt haben, ist der Temperaturfall in Jekaterinburg und Tomsk lediglich auf Advektion zurückzuführen. In Tomsk hatte der Kälteeinbruch am 10. morgens begonnen.

Die letzten beiden Stationen, die ebenfalls dem östlichen Steiggebiet angehören, zeigen nicht die geringsten Anzeichen von Advektion kalter Luft. Der Barometeranstieg ist zwar nicht so groß wie in den meisten anderen Stationen, aber doch immerhin groß genug, um beachtet zu werden. Der Druckanstieg in Barnaul und Belagatschkoe Zimovie ordnet sich ohne jeden Zwang dem Steiggebiet zu, dessen Wanderung durch Zentralasien wir bereits verfolgt haben. Nach allem, was wir bisher über seine Zugrichtung entnehmen konnten, müßte es am 10. Februar nach Westsibirien gekommen sein. Es wäre gewiß noch besser nachweisbar, wenn südlich von Belagatschkoe Zimovie noch Beobachtungen vorhanden wären.

Die Lage der Kaltfront in den Isallobarenkarten hat eine charakteristische Änderung erfahren. Auf den beiden zuerst behandelten Karten lag ihr Ostflügel auf der Grenze zwischen einem Fall- und einem Steiggebiet des Luftdruckes. Wir hatten einen Kälteeinbruch vor uns, der auf der Rückseite eines Minimums vor sich ging. Am 10. Februar hatte sich das Steigen des Barometers über die Kältewelle hinaus nach Osten verschoben, so daß nun die Kältewelle in einem Steiggebiete nach Osten vordrang. Ohne Kenntnis der räumlichen Verteilung des Steigens und Fallens des Barometers würde man diesen Vorgang dadurch erklären, daß man entweder ein Zurückbleiben der unteren oder ein Voreilen der oberen Druckwelle annehmen würde. Die Voraussetzung dieser Erklärung wäre, daß obere und untere Druckschwankung bisher miteinander eng gekoppelt durch Rußland gewandert wären. Dieses trifft jedoch nach allem, was wir über das zentralasiatische primäre Steiggebiet gefunden haben, nicht zu. Es kam von Südwesten, während das Steiggebiet der Kältewelle mit dieser von Norden kam. Die richtige Erklärung ist nicht eine Verschiebung zwischen oberer und unterer Druckwelle, sondern eine Kreuzung der Zugstraßen von zwei verschiedenartigen Steiggebieten, die zwar höchst wahrscheinlich in einer gewissen Wechselwirkung stehen, aber sich nicht gegenseitig bedingen.

Zu der Isallobarenkarte vom 10. zum 11. Februar (Karte 29) ist wenig zu bemerken. Auf die Zweiteilung des westlichen Steiggebietes wurde bereits hingewiesen. Der westliche Teil der Kältewelle, der am 10. in Polen lag, ist bereits am Schwarzen Meer angekommen, mit ihm ein Steiggebiet. Dies reichte allerdings über die Front der Kältewelle hinaus nach Osten. So hatte z. B. Lugansk bei einem Druckanstieg von 4.3 mm nur eine Abkühlung von kaum $^1/_2{}^0$. Die von Westen kommende Kaltluft hatte es noch nicht erreicht.

Das Steiggebiet in Westsibirien scheint am 11. vollständig von der Advektion kalter Luft beherrscht gewesen zu sein. Am stärksten war das Barometer in Omsk gestiegen. Mit der hierdurch angedeuteten Anhäufung kalter Luft steht in guter Übereinstimmung, daß von diesem Gebiete aus am folgenden Tage eine Kältewelle nach Westen wanderte.

Die Druckänderungskarte vom 11. zum 12. Februar 1898 (Karte 30) zeigte Barometeranstieg in einem Gebiete, das sich von Ungarn durch Mittel- und Südrußland nach Bogoslovsk—Surgut hinzieht. In Sibirien ist noch ein leichtes Steigen angedeutet, das unschwer seine Erklärung in der am Vortage vorübergezogenen Kältewelle findet. Durch Vergleich der Isallobarenkarten vom 11. und 12. findet man für die Form des Steigens in Rußland keine plausible Erklärung. Der Barometeranstieg nimmt vom Kern nach allen Seiten ab. Nur östlich des Urals ist ein sekundäres Maximum sehr schwach angedeutet. Perm, das dem Zentrum näherliegt, hatte 4.2, das entferntere Jekaterinburg 4.4 mm Druckanstieg.

Steiggebiet im europäischen Rußland.

	T 12.	ΔT 11./12.	Δp 11./12.	e 12.	Δe 11./12.	Wind 11.	Wind 12.	Bewölkg. 12.
Kursk	— 9.4	—9.0	+8.8	2.0	—2.5	SSE 4	SW 2	10
Lugansk	— 0.5	—2.6	+5.2	4.1	—0.9	C	NNE 1	10
Elatma	— 5.7	+0.8	+5.9	3.0	+0.2	E 6	E 5	10
Perm	—22.6	—3.2	+4.2	0.5	—0.3	NE 6	ENE 4	0
Uralsk	— 9.6	—3.6	+2.9	1.6	—0.9	ESE 3	E 6	10
Jekaterinburg	—26.2	—6.8	+4.4	0.5	—0.4	NE 2	NE 1	1

In Kursk ist die kalte Luft des Westflügels, die wir am Schwarzen Meer fanden, angelangt. Kursk wies als einzige Station SW-Winde auf. In den übrigen Stationen wehten durchweg E- und NE-Winde. Dabei war in Lugansk und Elatma noch keine exzessiv kalte und trockene Luft vorhanden. Diese lagerte bei Perm und Jekaterinburg und begann, sich nach Südwesten auszudehnen. Sie hatte am Morgentermin des 12. ungefähr Uralsk erreicht. Wenn auch die Erklärung des Druckanstiegs aus advektiven Vorgängen an den einzelnen Stationen keine wesentlichen Schwierigkeiten macht, so ist doch die einheitliche Struktur des ganzen Steiggebietes unverständlich.

Auf der folgenden Isallobarenkarte (Karte 31) sehen wir, daß sich das Zentrum des Steiggebietes nach Osten verschoben hat. Die Stärke des Druckanstiegs hatte sich im allgemeinen nicht geändert. Die von Osten heranfließende Kaltluft hatte sich weiter ausgedehnt.

Steiggebiet im europäischen Rußland.

	T	ΔT	Δp	e	Δe	Wind	Wind	Bewölkg.
	13.	12./13.	12./13.	13.	12./13.	12.	13.	13.
Smolensk	— 7.2	+ 1.5	+5.0	2.5	+0.4	C	C	10
Uspenskaja	— 6.8	+ 0.6	+5.0	2.6	+0.2	E 6	SE 5	10
Elatma	—11.1	— 5.4	+6.0	1.6	—1.4	E 5	E 5	5
Uralsk	—20.4	—10.8	+6.3	0.6	—1.0	E 6	E 8	0
Astrachan	— 6.3	— 4.7	+1.7	2.7	—1.2	NE 4	ENE 6	10
Lugansk	— 7.7	— 7.2	+3.4	2.0	—2.1	NNE 1	ENE 7	10

Wir finden für die Advektion kalter Luft nur in den westlichsten Stationen Smolensk und Uspenskaja keine Anzeichen. Nach Dampfdruck- und Temperaturänderung war das Steiggebiet in sich sehr verschieden. Der Druckanstieg zeigte keine Bevorzugung des Teiles, in dem ein Kälteeinbruch vorlag. Jedenfalls war er in den beiden Erwärmung zeigenden Stationen nicht viel schwächer als im Kern des Steiggebietes, wo bereits Advektion kalter Luft zu bemerken war.

Bis zum 14. (Karte 32) hatte die von Osten kommende Kaltluft das ganze Steiggebiet erfüllt. Der stärkste Anstieg betrug etwa 6 mm und lag am Nordende des Kaspischen Meeres.

Beobachtungen im südlichen Teil des Steiggebietes.

	T	ΔT	Δp	e	Δe	Wind	Wind	Bewölkg.
	14.	13./14.	13./14.	14.	13./14.	13.	14.	14.
Nikolaew	— 5.7	+0.2	+2.2	2.6	—0.1	N 12	NNE 10	10
Totaikoi	— 3.1	+2.0	+2.1	3.3	—0.5	SE 4	ENE 8	10
Stavropol	— 6.8	—3.4	+1.8	2.7	—0.8	SE 4	SE 3	10
Gudaur (2204 m)	— 8.9	—2.6	+0.4	1.9	—0.2	N 3	ENE 2	2
Aschabad	5.3	—0.7	+3.4	6.3	+0.2	W 3	W 2	10
Kasalinsk	—22.3	—6.0	+5.6	0.6	—0.4	NNE 7	NNE 7	2
Wernyi	—16.9	—5.4	+1.8	1.1	—0.7	W 1	W 1	10

In Nikolaew war die Advektion kalter Luft erfolgt, trotzdem die Temperatur gestiegen war. Darauf deutet die Windrichtung hin. In Aschabad ist die Kaltluft wahrscheinlich noch nicht angekommen. Da jedoch die Mittags- und Abendbeobachtungen des 14. Februar eine sehr viel niedrigere Temperatur angeben, als sie am 13. zu derselben Zeit geherrscht hatte, so ist eine troposphärische Herkunft des in Aschabad beobachteten Druckanstiegs trotzdem möglich.

Die von Osten gekommene Kaltluft hatte Gudaur erreicht, sie war also über 2000 m hoch.

Aus den letzten Isallobarenkarten ist eine eigentümliche Wanderung von Kaltluftmassen zu ersehen. Die Kälte kam nicht, wie gewöhnlich, von Norden oder Westen, sondern von Osten. Sie breitete sich, ausgehend von Westsibirien, bis zum Schwarzen Meer im Westen und Zentralasien im Süden aus. Daneben fand während einiger Tage noch eine Ausbreitung kalter Luft von Polen nach Südrußland und dem Schwarzen Meere hin statt. Die Isallobarenkarten zeigten jedoch keine Aufeinanderbewegung von zwei Steigzentren, wie man es bei einer derartigen Wanderung der Kaltluft erwarten sollte, sondern ein umfangreiches Gebiet mit Barometeranstieg, das ziemlich gleichmäßig beide Kältewellen umschloß. Es traten auch keine beträchtlichen Änderungen ein, als nur noch die von Osten kommende Kältewelle nachzuweisen war. Sie breitete sich in dem Steiggebiet immer mehr aus, bis sie es schließlich ganz mit kalter Luft angefüllt hatte.

Man wird den tatsächlichen Verhältnissen mit der Annahme eines rein sekundär bedingten Steigens wohl am nächsten kommen. Zuerst traten in dem ganzen Gebiet vermutlich östliche Winde auf, die einerseits am Ural die extrem kalte Luft nach Westen in Bewegung setzten, andererseits aber auch schon über den Stationen des mittleren Rußland eine Abkühlung dadurch hervorriefen, daß sie Luft aus den östlich von diesen Stationen gelegenen kälteren Gegenden zuführten. An das hierdurch entstandene Steiggebiet des Luftdruckes lagerte sich im Westen das Steiggebiet der von Polen kommenden Kältewelle. Diese Kältewelle wurde nun in der folgenden Zeit schwächer, aber in dem Maße, wie sie ihre drucksteigernde Wirkung verlor, wurde die der von Osten kommenden Kältewelle größer. Das am 13. von Temperaturänderungen unabhängige Steigen in Uspenskaja und Smolensk stellte wahrscheinlich den letzten Rest des unter der Wirkung der im Westen vorhandenen Kaltluft erfolgenden Steigens dar. Man kann sich ohne Schwierigkeit vorstellen, daß die Abkühlung in den über beiden Stationen liegenden Schichten durch die Hebung der oberen Begrenzung kalter Luft verursacht wurde. Diese Hebung könnte dadurch erklärt werden, daß die von Osten kommende kältere Luft die vor ihr liegende einfach aufstaute. Am 14. war in den Stationen des Steiggebietes die von Osten kommende Luft allein für den Druckanstieg maßgebend. Daß keinerlei primäre Bestandteile in dem Steiggebiet vorhanden waren, geht einerseits aus dem geringfügigen Druckanstieg auf Gudaur hervor, der in eine Zeit anhaltenden Druckfalles eingelagert war und mit Abkühlung verbunden auftrat, andererseits daraus, daß der Druckanstieg am 15., den wir auf der letzten mitgeteilten Isallobarenkarte (Karte 33) beobachten können, nur in den Gebieten eingetreten ist, in denen zuletzt die Advektion kalter Luft erfolgt war. Ein von Abkühlung in den unteren Schichten unabhängiges Steigen ist nicht zu finden.

Wir besprechen noch kurz einige andere Fälle, in denen sich eine Teilung der Kältewelle vollzogen hat.

10. bis 13. Januar 1898. Wir hatten diese Kältewelle bereits kurz als ein Beispiel für die wellenförmige Anordnung von Steiggebieten an der Polarfront erwähnt. Sie war vom 9. zum 10. gut ausgeprägt. In den südlichen Teilen der Steiggebiete fanden wir ein von der Kältewelle unabhängiges Steigen. Am 11. Januar hatte sich die Kältewelle geteilt. Der östliche Flügel war nach Westsibirien vorgedrungen, während sich der nach Rußland gewanderte Teil zwischen dem Ural und dem Schwarzen Meer befand. Das Gebiet stärksten Steigens lag zwar hinter der Kältewelle, aber über den westlichen Teil der Kaltfront hinaus zog sich noch ein Steiggebiet von 6—9 mm durch ganz Zentralasien. In den zentralasiatischen Stationen ist ein leichter Temperaturfall nur an den Morgentemperaturen zu konstatieren, die Tagesmittel der Temperatur hatten sich nicht verändert. Am nächsten Tage bestand die sonderbare Erscheinung fort, daß die westliche Kältewelle völlig im Bereich eines Steiggebietes verlief. Vor ihrer Front war das Barometer um 4, hinter ihrer Front um 9 mm gestiegen. Der Ostflügel der Kältewelle war am 12. bereits in das mittlere Sibirien eingedrungen. Am 13. Januar war der Barometeranstieg in den westsibirischen Stationen Belagatschkoe Zimovie und Barnaul wieder kräftiger geworden. Ein erneuter Zufluß kalter Luft von Norden ist als Ursache wenig wahrscheinlich, denn es herrschten östlich des Urals entweder West- oder besonders im nördlichen Teil von Westsibirien Südwinde. Die Bodentemperaturen lagen im allgemeinen etwas höher als am Vortage, waren aber sehr niedrig. Man könnte allenfalls an einen Kälteeinbruch über dieser seichten Bodenschicht extrem kalter Luft denken. Besser läßt sich dieses Steigen dadurch erklären, daß das Steigen in Zentralasien, das an den Vortagen ohne wesentliche Temperaturänderung aufgetreten war, sich nach Norden gewandt hat und nun in Westsibirien eine Verstärkung des durch den am 11. erfolgten Kälteeinbruch eingeleiteten Steigens verursachte. Die im Kartengebiet vom 10. bis zum 13. Januar eingetretenen Drucksteigerungen sind also am besten durch den Zug eines von der Kältewelle unabhängigen Steiggebietes und eines hinter der herangeströmten Kaltluft einsetzenden Steigens zu erklären. Die Fortpflanzungsrichtung des „hohen" Steiggebietes war wahrscheinlich von Südwesten nach Nordosten gerichtet.

26. bis 28. März 1899. Die Polarluft war am 26. März 1899 ungefähr bis zum 55. Breitengrade nach Süden vorgedrungen. Der größte Teil des Barometeranstiegs lagerte hinter der Kaltfront. Zwischen dem Ural und dem Kaspischen Meer finden wir jedoch auch vor der Front der Kältewelle Druckanstieg. So betrug in Uralsk z. B. die Drucksteigerung vom 25. zum 26. 10.2 mm, der Temperaturfall, aus den Morgenbeobachtungen abgeleitet, 2.1°, aus den Tagesmitteln berechnet, 1.1°. Noch geringer war er in Orenburg, wo er trotz eines Barometeranstiegs von 8.7 mm, aus den Tagesmitteln berechnet, nur 0.3° betrug. In Westsibirien war Barometeranstieg mit Temperaturfall aufgetreten. Am folgenden

Tage hatte sich die Kältewelle geteilt. Das Steigen des Luftdruckes war auf zwei kleine Zentren beschränkt, die sich mit den vorrückenden Teilen der Kältewelle in Übereinstimmung befanden. Das eine lag am Schwarzen Meer, das andere in Westsibirien bei Omsk und Surgut. Während das östliche Steigzentrum nach Osten wanderte, hatte sich am 28. März im ganzen europäischen Rußland wieder Barometeranstieg eingestellt, der nun vollständig hinter der Front einer vom Schwarzen Meer bis zum mittleren Ural reichenden Kältewelle lag. Die am 28. vom europäischen Rußland nach Osten rückende kalte Luft ist erst in Bewegung gesetzt worden und nur zum geringsten Teil mit der am Vortage zum Schwarzen Meer vorgedrungenen Kaltluft identisch. Die Erklärung des Steigens im mittleren Rußland ist leicht. Die am 26. im östlichen und mittleren Rußland zum Stillstand gekommene Kaltluft stellte ein latentes Steiggebiet dar, das in dem Augenblick auf der Isallobarenkarte wieder auftrat, als sich die Kaltluft in Bewegung setzte. Das Steiggebiet vom 28. stellt also die Fortsetzung des Steigens dar, das wir am 26. in Nord- und Mittelrußland hinter der Kältewelle beobachten konnten. Das Steigen, das am 26. von der Kaltluft unabhängig war und höchstwahrscheinlich auf primäre Ursachen zurückzuführen ist, war weitergezogen und kann ohne jeden Zwang mit dem am 27. März bei Omsk und Surgut eingetretenen Steigen identifiziert werden. Da in diesen Stationen jedoch gleichzeitig die Advektion kalter Luft erfolgte, so waren die Bedingungen zur Superposition gegeben. In Omsk stieg das Barometer um 20.3 mm. Da die Kaltluft des östlichen Flügels in Westsibirien liegenblieb, so war sie wahrscheinlich nicht mehr sehr hoch. Infolgedessen hätte sie allein vermutlich keinen derartigen Barometeranstieg hervorbringen können.

In den besprochenen Beispielen war die Zweiteilung der Wellen immer gut entwickelt. Die Druckverhältnisse aber waren sehr kompliziert. Eine den Beobachtungen einigermaßen entsprechende Erklärung war meist schwer zu geben. Es überwiegen auch in den übrigen Fällen, in denen eine Teilung der Kaltluftmassen eintrat, die aber hier nicht mehr angeführt werden können, komplizierte Verhältnisse über eine Anordung der Steiggebiete, die der Zweiteilung der Welle entsprach. Man kommt infolgedessen zu der Vermutung, daß hier ein Zusammenhang vorliege. Die verschiedenen Fälle wurden hinsichtlich ihrer Druckverteilung untereinander verglichen. Es hatte den Anschein, daß eine antizyklonale Wetterlage die Regelmäßigkeiten in der Anordnung der Isallobaren störe, während sie bei einer zyklonalen Wetterlage meist gut entwickelt waren. Etwas Sicheres konnte jedoch nicht festgestellt werden, da einerseits zu wenig Fälle mit Teilung der Kältewelle vorhanden waren, andererseits die Isallobarenkarten in Zentralsibirien für die meisten Fälle nicht sicher genug gezeichnet werden konnten.

Aus den angeführten Beispielen kann man ersehen, daß die Bewegung der Kaltluftmasse keinesfalls genügt, um bei einer Kältewelle die Verteilung der Steiggebiete des Luftdruckes zu erklären. Als nächstes untersuchten wir nun in jedem einzelnen Beispiel, ob die beobachteten Verhältnisse durch das Auftreten wandernder, von dem Hauptpolarluftausbruch unabhängiger Kaltluftmassen erklärt werden konnten. Auch dies entsprach den Beobachtungen nicht sehr häufig. In einzelnen Fällen gelang die Erklärung der Steiggebiete, wenn wir eine Abkühlung annahmen, die an den verschiedenen Stationen nicht in Zusammenhang stand, die also nicht an eine zusammenhängende Luftmasse geknüpft war. Eine solche Erklärung befriedigt jedoch wenig, denn die Verlagerung der Steigzentren, wie auch ihre Erstreckung wird durch eine solche Annahme in hohem Maße vom Zufall abhängig gemacht. Wir haben als letztes versucht, den Verhältnissen dadurch gerecht zu werden, daß wir die Superposition zweier, hinsichtlich ihrer Ursachen verschiedener Arten von Steiggebieten annahmen. In einigen Fällen kamen wir hierdurch zu einer guten Annäherung an die beobachteten Verhältnisse, jedenfalls zu einer besseren, als sie je durch die Bewegung von Kaltluftmassen am Erdboden gegeben werden konnte.

III. Die Steiggebiete beim Verschwinden der Kältewelle.

Nachdem wir die Steiggebiete beim ersten Erscheinen der Kaltluft und bei ihrer Wanderung durch Rußland, Zentralasien und Westsibirien verfolgt haben, wollen wir noch ein Beispiel für das Verhalten der Steiggebiete beim Verschwinden der Kältewelle anführen. Der Fall, daß die Kältewelle aus dem Bereich der Isallobarenkarte austritt, braucht nicht berücksichtigt zu werden. Wir wollen die Fälle anführen, bei denen die Kältewelle bereits im Bereich unserer Isallobarenkarten aufhörte. Dies fand vorzugsweise in Zentralasien statt, wo die Kaltluft gegen die zentralasiatischen Gebirge strömte,

sich aufstaute und damit ihre potentielle Energie vollständig einbüßte. Das mit der Kaltluft verbundene Steiggebiet verschwand ebenfalls.

2. bis 4. Oktober 1901 (Karte 34—36). Das Steiggebiet der Kältewelle war durch Mittelrußland über den Kaukasus und das Schwarze Meer nach Zentralasien gewandert. Am 2. Oktober reichte es ungefähr von Taschkent bis Astrachan.

Steiggebiet am 2. Oktober (Karte 34).

	T	ΔT	Δp	e	Δe	Wind	Wind	Bewölkg.
	2.	1./2.	1./2.	2.	1./2.	1.	2.	2.
Astrachan	3.7	+1.6	+3.1	3.8	−0.9	W 4	W 4	0
Aschabad	11.2	−3.5	+8.4	7.6	−2.7	NW 8	SW 2	10
Samarkand	9.2	−9.0	+5.5	7.6	−1.0	SE 1	SW 3	10
Taschkent	9.7	−6.2	+3.3	8.9	−1.8	SE 1	NW 2	10

Die Stationen mit stärkstem Barometeranstieg lagen dem Gebirge am nächsten. Die Kaltluft brandete gewissermaßen gegen das Gebirge. Sie stieg in unmittelbarer Nähe des Gebirges am schnellsten in die Höhe. Daß eine Hebung der Kaltluft, ein Aufstauen am Gebirge, eintrat, geht aus dem Wetter in Zentralasien hervor. Dort herrschte durchweg starke Bewölkung mit Regen. In Astrachan fand sich das schlechte Wetter nicht mehr. Leider fehlten 1901 die Beobachtungen von Kasalinsk. Die Wetterverschlechterung in Zentralasien würde durch Vergleich mit dieser Station noch mehr hervorgehoben werden. An der Front der Kaltluft wehten Winde mit einer auf das Gebirge hingerichteten Komponente. Dieses zeigte z. B. Aschabad am 1. und Taschkent am 2. Oktober. Nach dem Einbruch drehten die Winde auf Südwest. Die Kaltluft floß am Gebirge entlang oder zum Teil schon wieder zurück in die vorgelagerten ebenen Gebiete. Damit war jedoch vermutlich noch kein Seichterwerden der Kaltluft verbunden. Die vom Gebirge weggerichtete Komponente des Windes war wahrscheinlich zunächst nur auf eine niedrige Luftschicht beschränkt.

Steiggebiet am 3. Oktober 1901 (Karte 35).

	T	ΔT	Δp	e	Δe	Wind	Wind	Bewölkg.
	3.	2./3.	2./3.	3.	2./3.	2.	3.	3.
Samarkand	6.4	−2.8	+ 2.0	5.3	−2.3	SW 3	SE 3	10
Taschkent	7.0	−2.7	+ 5.0	6.9	−2.0	NW 2	NNE 1	0
Wernyi	6.0	−7.5	+14.3	6.8	−3.1	C	SW 1	10
Bel. Zimovie	4.4	−2.6	+ 8.6	5.7	−0.4	SE 4	SW 6	6
Barnaul	−0.6	−3.7	+ 3.2	4.0	−1.3	NNW 5	W 4	10
Akmolinsk	3.2	−0.5	+ 7.0	5.5	−0.3	NE 5	WNW 3	10

Der kräftigste Barometeranstieg fand sich wieder in den Stationen, die dem Gebirge am nächsten lagen. Das Wetter an den einzelnen Beobachtungsorten läßt eine ähnliche Interpretation wie am Vortage zu. Die westlichsten Stationen zeigen Aufheiterung. In Taschkent war sie bereits am Morgentermin eingetreten, in Samarkand trat sie am Mittag in Erscheinung. Die Winde von Taschkent stimmten allerdings nicht mit der Annahme überein, daß ein Rückströmen kalter Luft eintrat. Die Winde in Samarkand passen besser zu unserer Annahme. In Wernyi und Bel. Zimovie hatten die Winde eine leichte auf das Gebirge hingerichtete Komponente. Es herrschte schlechtes Wetter. Der teilweise aufgeheiterte Himmel in Bel. Zimovie wurde nur am Morgentermin beobachtet, an den übrigen Terminen war der Himmel ganz bedeckt. Hierfür kann man allerdings auch die in Zentralasien herrschende Wetterlage verantwortlich machen. In Barnaul war kalte Luft von Westen zugeflossen. Die am Erdboden eingetretene Abkühlung stand wohl nicht mehr mit der am Rande der Gebirge hingezogenen Kaltluft in Verbindung. Dasselbe wird man bei Akmolinsk annehmen müssen. Da die durch Zentralasien gewanderte Luft in den unteren Schichten wärmer war als die in Akmolinsk und Barnaul vorhandene, so hat sich hier wahrscheinlich ein Aufgleitvorgang eingestellt. Die durch Zentralasien geflossene Luft war nur noch in der Höhe vorhanden, wo sie vermutlich Abkühlung gebracht hatte, so daß man den an diesen Stationen eingetretenen Druckanstieg niedrig-troposphärisch erklären kann.

Am 3. Oktober finden wir auch im mittleren Rußland ein Steigen des Barometers. Es kann mit einem am 2. Oktober im Nordwesten erschienenen Steiggebiet in Zusammenhang gebracht werden. Mit einer ausgesprochenen Kältewelle stand das Steiggebiet nicht in Verbindung.

Die Karte der Barometeränderungen vom 3. zum 4. Oktober (Karte 36) zeigt uns an der Stelle, an der am Vortage das durch Zentralasien gewanderte Steiggebiet lag, ein Fallen des Barometers. Das Steiggebiet ist völlig verschwunden, nicht nach anderen Gebieten abgezogen; denn sonst müßten wir in einem Teil der Karte noch ein schwaches Zeichen seines Bestehens finden. Das Steigen am unteren Ob kann mit der Advektion kalter Luft von Westen und Norden erklärt werden.

Beobachtungen
in den am 3. Oktober in einem Steiggebiet gelegenen Stationen.

	T	ΔT	Δp	e	Δe	Wind	Wind	Bewölkg.
	4.	3./4.	3./4.	4.	3./4.	3.	4.	4.
Samarkand	5.4	—1.0	—3.7	6.4	+1.1	SE 3	S 1	0
Taschkent	5.2	—1.8	—4.8	6.6	—0.3	NNE 1	C	0
Wernyi	3.7	—2.3	—3.4	4.9	—1.9	SW 1	S 1	1
Bel. Zimovie	2.9	—1.5	—0.6	4.2	—1.5	SW 6	SW 4	10
Barnaul	2.2	+2.8	—3.0	4.9	+0.9	W 4	SW 4	4
Akmolinsk	—0.1	—3.3	+0.3	4.0	—1.5	WNW 3	W 7	10

Die drei ersten am Rande der zentralasiatischen Gebirge liegenden Stationen bestätigen unsere Auffassung, daß ein Aufstauen und darauffolgendes Abfließen und Zusammensinken der Kaltluft eingetreten ist. Es herrschten entweder Windstillen oder vom Gebirge weggerichtete Winde. Alle Stationen hatten heiteres, meist sogar wolkenloses Wetter. Der Barometerfall erklärt sich in Übereinstimmung mit den Werten der übrigen meteorologischen Elemente durch das Auseinanderfließen und Zusammensinken der Kaltluft.

Die Stationen in Westsibirien und dem nördlichen Zentralasien zeigen die für ein Zusammensinken kalter Luft typischen Merkmale nicht. Dies erklärt sich leicht daraus, daß hier die Vorbedingungen für das Aufstauen der Kaltluft nicht mehr vorhanden waren. Hohe Gebirge fehlen, und zudem war die von Südwesten kommende Kältewelle kaum bis in diese Gebiete vorgestoßen. Ferner geht daraus hervor, daß die Besserung des Wetters in Zentralasien nicht in der allgemeinen Wetterlage begründet war.

Der Vorgang, den wir verfolgt haben, stellt ein Analogon zu den Erscheinungen dar, die sich beim Auflaufen von Wasserwellen auf einen Strand vollziehen, ohne daß sich die Welle überstürzt. Die vordringende Kaltluftmasse entspricht der vordringenden Wassermasse. Ein Ansteigen der Wassersäule über einen Punkt des vorher vom Wasser nicht bespülten Strandes beobachten wir so lange, als das Wasser noch vordringt, während die Wassersäule beim Zurückfluten des Wassers immer niedriger wird. Dieselbe Beziehung besteht zwischen der vertikalen Erstreckung der Kaltluft und ihrem Vordringen, was sich aus dem Vergleich des Wetters und der Windrichtung in den zentralasiatischen Stationen zeigen ließ.

Es sollen kurz noch einige Beispiele für das Verschwinden des Barometeranstiegs im Bereich der Isallobarenkarte angeführt werden.

20. bis 22. Dezember 1898. Die Kältewelle war in Verbindung mit einem Steiggebiet von Mittelrußland nach Zentralasien gewandert. Am 20. Dezember lagerte der Kern des Steiggebiets zwischen Aschabad und Samarkand. Das Steiggebiet zog dann am Rande des Gebirges nach Nordosten und hatte sich am 21. mit einem Steiggebiet in Westsibirien verbunden. An die Stelle des Steiggebietes vom 20. war am 21. ein Fallgebiet getreten. Vom 21. zum 22. Dezember war das Barometer auch im nördlichen Zentralasien und in Westsibirien gefallen. Am unteren Ob und in Zentralasien war das Barometer gestiegen. Dieses Steigen stand jedoch mit der durch Zentralasien gewanderten Kältewelle nicht in Verbindung. Sie war am 21., ohne das westliche Sibirien zu erreichen, verschwunden. Das Wetter in den zentralasiatischen Stationen zeigte die für das Aufstauen und Zusammensinken kalter Luft charakteristischen Merkmale. Die Übereinstimmung zwischen Wind und Bewölkung, die wir im ersten Falle beobachteten, fand sich allerdings nicht. Die Winde wiesen fast durchweg eine gegen das Gebirge gerichtete Komponente auf, waren jedoch sehr schwach. Ist aber unsere Erklärung vom Aufstauen der Kaltluft an dem Gebirge richtig, so muß sich auch ein Zusammenhang zwischen dem Gang des Barometers und dem der Bewölkung ergeben. Steigendes Barometer und starke Bewölkung, sowie fallendes Barometer und Aufheiterung müssen zusammen auftreten. Der höchste Barometerstand muß bedeckten von heiterem Himmel scheiden. Diese Beziehungen waren bei dieser Kältewelle an

den einzelnen Stationen gut ausgeprägt. In Aschabad wurde der höchste Luftdruck beim Vorübergang des Steiggebietes am 19. abends gemessen. Am folgenden Tage wurde es heiter. Die Winde gingen gleichzeitig von westlichen Richtungen auf östliche und südliche über. In Samarkand herrschten die höchsten Barometerstände am 20. mittags und abends. Am Morgen war der Himmel noch ganz bedeckt, am Abend wolkenlos. In Taschkent wurde der höchste Barometerstand am 20. mittags beobachtet. Es trat gleichzeitig der Übergang von bedecktem zu völlig wolkenlosem Wetter ein. In Wernyi beobachtete man den höchsten Barometerstand am Abend des 20. Zu derselben Zeit wurde Bewölkung 10^2 angegeben. Am Morgen des 21., als das Barometer bereits gefallen war, war nur noch $^1/_{10}$ des Himmels von Wolken bedeckt. Die Aufheiterung allein durch die normalerweise in jedem wandernden Kaltluftkörper auftretende Auflösung der Wolkendecke zu erklären, ist nicht möglich, da diese im allgemeinen schon vor der Erreichung des höchsten Barometerstandes einsetzt. Bei den zentralasiatischen Stationen trat sie aber durchweg erst mit fallendem Luftdruck auf.

Als Beispiele für das Verschwinden eines Steiggebietes im Bereich der Karte wollen wir noch zwei Fälle aus dem November 1902 anführen. Die in dieser Zeit auftretenden Kältewellen sind von Ficker in der eingangs angeführten Arbeit, an die sich diese ja eng anschließt, eingehend behandelt worden. Die Veränderungen der Wetterlage folgten bei diesen Kältewellen so rasch aufeinander, daß sich in den zentralasiatischen Stationen ein Gang der Bewölkung nicht ausbilden konnte. Es herrschte fast immer bedeckter Himmel.

9. bis 10. November 1902. Vom 8. zum 9. November war das Barometer nur hinter dem südlichen Flügel der Kältewelle in Zentralasien gestiegen, in Aschabad um 11.1, in Kasalinsk um 7.7 mm. Das vom Steiggebiet überdeckte Gebiet reichte vom Kaukasus bis nach Wernyi. Am 10. war von dem ganzen Steiggebiet in Zentralasien nur noch ein Barometeranstieg von 3.2 mm in Samarkand übriggeblieben. Die übrigen Stationen zeigten einen Barometerfall von 2—6 mm. Ob der Barometeranstieg in Samarkand reell war, kann man bezweifeln, da die Beobachtungen vom 10. morgens fehlten. Sie sind in den russischen Jahrbüchern interpoliert angegeben und als unsicher bezeichnet worden.

18. bis 20. November 1902. Wir haben im vorhergehenden immer das Aufhören des Barometeranstiegs in Zentralasien dadurch erklärt, daß wir ein Aufstauen und nachheriges Abfließen der Kaltluft vor den hohen zentralasiatischen Gebirgen annahmen. Es gibt aber auch Fälle, in denen die Kaltluft bereits im Flachland aus irgendwelchen Gründen zur Ruhe kam und infolgedessen auch das mit ihr verbundene Steiggebiet verschwand. Dies trat z. B. am 18. November 1902 ein. Eine gut entwickelte Kältewelle kam nur bis nach dem nördlichen Zentralasien. In Kasalinsk und Wernyi war sie noch nachweisbar, in Taschkent nicht mehr (siehe Ficker: Ausbreitung kalter Luft[3]). Am 18. reichte ein zusammenhängendes Steiggebiet von Westsibirien bis nach Europa. Im Norden wurde es ungefähr durch den 55. Breitengrad begrenzt. Mit der Advektion kalter Luft läßt sich nur der in Zentralasien erfolgte Luftdruckanstieg nicht erklären. Vom 16. zum 17. war das Barometer in Aschabad bereits gestiegen, während die Kaltluft erst das Nordende des Kaspischen Meeres erreicht hatte (Aschabad 16./17.: $\Delta p = +7.2$ mm, $\Delta T = +2.4^0$). Am 18. hörte die weitere Verbreitung der Kältewelle und mit dieser das thermisch-sekundär bedingte Steiggebiet auf. Der Übergang zum Barometerfall wurde dadurch noch beschleunigt, daß von Norden eine Wärmewelle heranzog. Von dem riesigen Steiggebiet des 18. war am 19. fast nichts übriggeblieben. Am Schwarzen Meer war das Barometer noch um 1.4 mm gestiegen, etwa um denselben Betrag in Taschkent und Samarkand, in diesen beiden Stationen mit geringem Temperaturanstieg verbunden. Die von Norden heranziehende Wärmewelle scheint auf die Druckänderung in Zentralasien zunächst nur einen geringfügigen Einfluß ausgeübt zu haben. Vom 19. zum 20. war das Barometer in den beiden zuletzt genannten Stationen kaum um 1 mm gefallen. Die Wärmewelle erreicht am 21., also am folgenden Tage, das Gebirge.

Die Trennung in zwei Steiggebiete liegt offen zu Tage. Das mit der Kältewelle verbundene thermisch-sekundär bedingte verschwand mit der Kältewelle. Es stellte den Hauptteil des Steigens am 18. November dar. Der von der Kältewelle unabhängige Teil zog von Westen nach Osten durch Zentralasien und bedingte am 17., 18. und 19. Barometeranstieg, am 20. eine Abschwächung des durch die herannahende Wärmewelle bedingten Druckfalles. Auf der Isallobarenkarte vom 21. November war er in Zentralasien nicht mehr vorhanden. Da aber in Westsibirien ein Druckanstieg eingetreten war, der zunächst nur in den nördlichsten Stationen mit der Advektion kalter Luft verbunden auftrat, kann man annehmen, daß sich das von der Kältewelle unabhängige Steiggebiet nach Sibirien gewandt

hat. Es kann auch über das Gebirge nach Osten weitergewandert sein, was bei seiner von niedrig-troposphärischen Vorgänge unabhängigen Existenz gut denkbar ist.

Wir hatten in dieser Arbeit immer darauf hingewiesen, daß die Bewegung der Kaltluftmassen nicht genüge, um die eintretenden Druckschwankungen zu erklären. Die in diesem Abschnitt angeführten Beispiele zeigen, daß man ihre drucksteigernde Wirkung aber auch nicht unterschätzen darf. Die Erkenntnis der mit ihr vorgehenden Veränderungen gibt uns schon einen tiefen Einblick in die Ursachen der Druckänderung. Bei einer Analyse der Isallobarenkarten wird man auf sie nicht verzichten können. Kommt die Kaltluft zur Ruhe, so verschwindet plötzlich ein Steiggebiet, setzt sie sich wieder in Bewegung, so tritt andererseits ein Steiggebiet auf, das vorher im Kartenbild nicht zu erkennen war. Die Erkenntnis der sekundär bedingten Druckschwankung muß jedem Versuch, eine synoptische oder anders geartete Darstellung der primären Komponente zu liefern, vorausgehen.

C) I. Zusammenfassung der gewonnenen Ergebnisse.

Die Untersuchung der bei den Kältewellen in Rußland auftretenden Steiggebiete ließ zunächst eine enge Beziehung zwischen dem Steigen des Barometers und der Ankunft der polaren Luftmasse erkennen. Die Erklärung des Barometeranstiegs war in diesem Fall einfach. Die Drucksteigerung wurde unmittelbar durch den beobachteten Kälteeinbruch hervorgerufen. Die hierbei auftretenden Erscheinungen lassen sich nach dem Bewegungszustand der Kaltluft in drei Sätzen zusammenfassen.

1. Eine in Bewegung befindliche Kaltluft erscheint auf der Isallobarenkarte als ein wanderndes Steiggebiet. Ausschlaggebend für die Größe des Barometeranstiegs ist in erster Linie die Geschwindigkeit des Vorrückens der Kaltluft, der Temperaturfall am Erdboden ist weniger von Bedeutung.

2. Liegt im Bereich der Isallobarenkarte eine Kaltluftmasse, die noch genügende potentielle Energie besitzt, um unter geeigneten Bedingungen weiterwandern zu können, so stellt sie ein „latentes" Steiggebiet dar. Dieses tritt dann wieder in Erscheinung, wenn sich die Kaltluft in Bewegung setzt. Es entsteht an Ort und Stelle, zieht nicht erst von anderen Gegenden der Karte heran. In der Umgebung einer ruhenden Kaltluftmasse liegt also ein Quellgebiet für Steiggebiete des Luftdruckes. Dieser Vorgang wird häufig dadurch verschleiert, daß bereits ein heranwanderndes Steiggebiet vorhanden ist, das sich nun in der Nähe der Kaltluftmasse verstärkt.

3. Kommt eine wandernde Kaltluftmasse zur Ruhe, so verschwindet gleichzeitig das durch ihre Wanderung hervorgerufene Steiggebiet. Ob es sich um das völlige Ende der Kältewelle oder nur ein vorübergehendes Stagnieren der Kaltluft handelt, erkennt man meist daran, ob das Barometer innerhalb der Kaltluft noch schwach weitersteigt oder nicht. Im ersteren Fall besteht in der Höhe noch ein Zufluß polarer Luft, die Kältewelle kann sich wieder in Bewegung setzen und ein wohlausgebildetes Steiggebiet erzeugen. Im zweiten Fall haben wir das Ende der Kältewelle vor uns. Es kommen dabei zwei Varianten vor. Einmal kann die Kältewelle in der Ebene zum Stillstand kommen. In diesem Fall ist das Verschwinden des Steiggebietes nicht lokal bedingt. Keine Gegend ist vor der anderen wesentlich ausgezeichnet. Der zweite, meteorologisch interessantere Fall spielt sich vorwiegend in Zentralasien ab. Eine noch lebenskräftige Kältewelle strömt gegen das Gebirge, staut sich und sinkt dann in sich zusammen.

Die angeführten Zusammenhänge zwischen Kaltluftmasse und Steiggebiet sind einfach und meist bekannt. Einen wesentlichen Fortschritt in unserer Erkenntnis über die Natur der Barometerschwankungen werden wir jedoch machen, wenn wir mit Hilfe des angeführten Beobachtungsmaterials zu beantworten versuchen, 1. ob sich durch die Wanderung einer russischen Kältewelle alle mit ihr auftretenden Steiggebiete, beziehungsweise alle Teile derselben erklären lassen, 2. ob die von einer Kältewelle unabhängigen Steiggebiete gemeinsame Eigenschaften aufweisen, aus denen man Schlüsse auf die Natur ihrer Ursache ziehen kann.

Die erste Frage muß verneint werden. Wir haben an den Beobachtungen bewiesen, daß der vom Eismeer nach Rußland erfolgte Polarluftvorstoß nicht sämtliche auftretende Steiggebiete bedingte.

Die zweite Frage läßt sich nicht so einfach beantworten. Wir werden zunächst die Eigenschaften der unabhängigen Steiggebiete aufzählen. Infolge der hier eingeschlagenen Methode ist ein von der Kältewelle unabhängiges Steiggebiet zunächst mit einem Steiggebiet des Barometers identisch, das nicht hinter der Front der Kaltluft liegt. Da es aber von vornherein möglich ist, daß auch ein

Teil des Steigens hinter der Front nicht von der Kältewelle herrührt, so können wir überhaupt die Eigenschaften der auf den Isallobarenkarten vorhandenen Steiggebiete anführen, die nicht mit der Bewegung der Kaltluftmasse in Übereinstimmung stehen.

1. In den außerhalb der Kältewelle vorhandenen Steiggebieten des Barometers traten keine einheitlichen Temperaturänderungen auf. Es fanden sich Stationen mit Abkühlung und solche mit Erwärmung in einem Steiggebiet. Manche Steiggebiete zeigten auch durchweg Erwärmung. Der Betrag der Druckänderung hing dabei wenig von der Größe der Temperaturänderung ab.

2. Sie ließen sich, falls es die Wanderung der Kältewelle nicht verhinderte, auf den Isallobarenkarten aufeinanderfolgender Tage in der Regel wiederfinden und zeigten dann ebenfalls eine Unabhängigkeit von den Temperaturänderungen am Erdboden.

3. Sie entstanden nicht in Rußland, sondern traten zuerst am Rande des Kartenbildes auf. Sie kamen meist von Europa und erschienen dann in Polen oder an der Ostsee. Viele traten auch zuerst im Süden beim Schwarzen und beim Kaspischen Meer auf und waren augenscheinlich vom Mittelmeer gekommen.

4. Verschwand die Kältewelle und das durch sie bedingte Steiggebiet aus irgendeinem Grunde, so blieb der von der Kältewelle unabhängige Bestandteil bestehen.

5. Die Wanderung des unzerlegten Steiggebietes einer Kältewelle stimmte nicht immer mit der der Kaltluftmassen überein, sondern ihre Bahnen standen häufig aufeinander senkrecht. Die Kaltluft wanderte in Rußland meist von Norden nach Süden, während die Steiggebiete vorzugsweise von Westen nach Osten zogen. Besonders gut war dies Verhalten in den Fällen ausgeprägt, in denen bei einer Kältewelle verschiedene, zeitlich voneinander getrennte Steiggebiete auftraten.

6. Es trat eine Superposition von Steiggebieten auf. Über das mit der Kaltluft in Zusammenhang stehende Steiggebiet lagerte sich das unabhängig von ihr nach Osten ziehende. Die Erscheinung der Superposition wurde zunächst dadurch sehr wahrscheinlich gemacht, daß sich nur mit ihrer Hilfe die Erscheinungen befriedigend erklären ließen. Ein direkter Beweis für eine Superposition lag außerdem bei den Fällen vor, bei denen hinter der Front einer Kältewelle ein Wechsel in den Steiggebieten beobachtet wurde. In diesen Fällen blieb die Kaltluft ungefähr an Ort und Stelle liegen oder wanderte nach Süden, während ein Steiggebiet von Westen nach Osten über sie hinzog.

Fragt man nach der Ursache des von der Kältewelle unabhängigen Steigens, so meint man damit in erster Linie die Frage nach der Höhe der Schichten, in denen die Massenänderungen vor sich gehen, die den Barometeranstieg am Erdboden hervorriefen. Wir müssen also versuchen, aus der horizontalen Verteilung meteorologischer Elemente Schlüsse auf Veränderungen in vertikaler Richtung zu ziehen. Hier kommt uns nun zustatten, daß wir unsere Untersuchungen nicht mit Hilfe der Temperaturänderungen, wie etwa Defant in seiner anfangs angeführten Abhandlung es getan hat, ausgeführt haben, sondern daß wir die Verlagerung einer Kaltluftmasse untersuchten. Nach den modernen Anschauungen stellen wir uns eine solche als von der umgebenden Luft durch eine bewegliche, aber undurchdringliche Schicht getrennt vor, wir lassen also eine Mischung mit anderen Luftmassen nicht zu. Die Begrenzung der Kaltluft steigt vom Schnitt mit der Erdoberfläche, also in unserem Falle von der Front der Kältewelle, schräg nach oben an. Ihre maximale Höhe, nach deren Erreichung sie sich wieder dem Erdboden nähert, beträgt in Europa etwa 4—5 Kilometer. In Rußland, das dem Ursprungsort der Kaltluft näher liegt, wird sie zum mindesten nicht kleiner, eher sogar größer sein. Nehmen wir nun an, daß um 7^h morgens die Front der Kaltluft über eine Station hinweggehe und daß die Kaltluft 24 Stunden später die größte Höhe über der Station erreicht habe, so können in dieser Zeit sämtliche Massenänderungen in der Schicht vom Erdboden bis zur maximalen Höhe der Kaltluft nur durch den Einbruch der Kaltluft bedingt worden sein, da diese ja von der sie umgebenden Luft vollständig abgetrennt ist. Beobachten wir also noch ein nicht durch die Kältewelle hervorgerufenes Steigen, so können die Vorgänge, die dieses hervorrufen, nur in solchen Schichten gesucht werden, die über der durchschnittlichen Höhe der wandernden Kaltluftmassen liegen. In dieser Untersuchung wiesen die von der Kaltluftmasse unabhängigen Steiggebiete keine einheitlichen Temperaturänderungen auf. Da sie nun aber aller Wahrscheinlichkeit nach durch Abkühlung in irgendwelchen Schichten hervorgerufen wurden, so konnten diese Schichten dem Erdboden nicht unmittelbar aufliegen. Es wäre also zunächst denkbar, daß die über die Front einer Kältewelle hinausreichenden Steiggebiete durch wandernde Kaltluftmassen bedingt wurden, die von einem Polarluftausbruch in einem anderen Teil der Erde stammten. Man könnte ohne Zwang annehmen, daß diese in ihren untersten Schichten

durch Anheizung ihren Charakter als Polarluft bereits eingebüßt haben. Es ist jedoch nicht möglich, durch diese Annahme die beobachtete Erscheinung der Superposition von Steiggebieten zu erklären. Sie kann nur dann eintreten, wenn die Ursachen der beiden zur Superposition gelangenden Steiggebiete in Schichten liegen, die sich in verschiedenen Höhen der Atmosphäre befinden. Da die drucksteigernden Vorgänge in der unteren Troposphäre in dem behandelten Material mit der in Rußland ausgelösten Kältewelle identisch waren, so können die Vorgänge, die die zweite Art von Steiggebieten verursachten, frühestens in der mittleren und oberen Troposphäre ihren Sitz haben.

Die Erscheinungen, die sich auf die Wanderung der Steiggebiete des Barometers beziehen, zeigen eine weitgehende Selbständigkeit und Unabhängigkeit des Barometeranstiegs von dem Vorrücken der Kaltluft. Dadurch wird es sehr wahrscheinlich gemacht, daß nicht die unmittelbar über der Kaltluft lagernden Schichten die zweite Art von Steiggebieten hervorbringen. Nehmen wir jedoch an, daß über den Schichten, die gewöhnlich von den Kältewellen betroffen werden, sich zunächst solche befinden, die für die Entstehung der Druckschwankung am Boden keinen oder nur einen geringen Beitrag liefern, so werden wir dazu geführt, die Ursache des von der Kältewelle unabhängigen Steiggebietes in der obersten Troposphäre und der Substratosphäre oder darüber zu suchen. Wir gewinnen hiermit den Anschluß an die Fickerschen Arbeiten. Unsere von der Kältewelle unabhängigen Steiggebiete stellen also wahrscheinlich einen Teil der horizontalen Verteilung des primären Bestandteils der Bodendruckschwankung dar.

Diese Ähnlichkeit mit den Ergebnissen der Fickerschen Arbeiten (besonders[3]) spricht auch aus zwei Erscheinungen, deren Realität zwar nicht bewiesen wurde, die jedoch wegen ihres häufigen Auftretens als wahrscheinlich vorhanden angenommen werden müssen.

1. Die unabhängig von der Kaltluft auftretenden Steiggebiete sind häufig mit einem vorangehenden Fallgebiet verknüpft. Die Aufeinanderfolge eines Fall- und eines Steiggebietes des Luftdruckes, die wir kurz ein System von Isallobaren nannten, stellt nun in den meisten Fällen eine Depression dar. Wenn wir also gerade bei dem Steiggebiete eines Isallobarensystems eine Unabhängigkeit von der Advektion kalter Luft an der Erdoberfläche fanden, so können wir hiervon auf eine komplexe, also auch primäre Natur der Depressionen schließen.

2. Die Vorderfront der nach Osten vorrückenden Kältewelle fällt vermutlich in der Nähe des Depressionszentrums nicht mit dem Beginn des primär verursachten Steigens zusammen, sondern dieses beginnt erst nach dem Einbruch der Kaltluft.

Dieser Schluß wird aus folgenden Beobachtungen gezogen: Bei den russischen Kältewellen leitete der Kälteeinbruch in den meisten Fällen, besonders wenn die Kälte nach Osten vorwärts drang, den Barometeranstieg ein. Sehen wir von der Wirkung einer vorhergehenden Wärmewelle ab, so kann diese Erscheinung nur dadurch zustandekommen, daß der Kälteeinbruch bei fallendem Druck in der Höhe eintritt oder daß primärer und sekundärer Druckanstieg unmittelbar zusammenfallen. Die dritte Möglichkeit wäre, daß der Druck in der Höhe konstant bleibt. Das letztere ist nun nach den in der Untersuchung gewonnenen Ergebnissen nicht anzunehmen; gegen die zweite Möglichkeit sprechen die Beobachtungen in Gudaur. Es bleibt also nur die erste bestehen.

Im Verlaufe unserer Betrachtungen gewannen wir einige Einblicke in den Mechanismus eines Kältevorstoßes.

1. Ein Vorstoß polarer Luft nach Süden stellte sich bei der Betrachtung der zugehörigen Isallobarenkarten als ein zweiteiliger Vorgang dar.

Der erste Teil des Polarluftvorstoßes bestand in einer Ansammlung kalter Luft in der Umgebung der Ausbruchsstelle. Er war auf den Isallobarenkarten durch unregelmäßig auftretende Steiggebiete im hohen Norden charakterisiert.

Der eigentliche Ausbruch polarer Luft begann erst dann, wenn im Süden ein Steiggebiet, meist ein System von Isallobarengebilden vorüberzog. Das Steiggebiet trat gewöhnlich zunächst nicht in Verbindung mit einer Kältewelle auf, war also nicht niedrig-troposphärisch bedingt. Häufig wanderte es an der Eismeerküste nach Osten weiter, ohne die Kältewelle gleich hinter sich herzuziehen. Der Kälteeinbruch im mittleren und südlichen Rußland erfolgte dann erst im Gefolge eines zweiten, oft sogar auch erst im Gefolge eines dritten von Westen nach Osten ziehenden Steiggebietes.

2. Der Vorstoß kalter Luft nach Süden ging in einem Steiggebiet vor sich, und zwar wurden die Teile des Steiggebietes, die in unmittelbarer Nähe des heranziehenden Fallgebietes lagen, am schnellsten von der Kaltluft ausgefüllt, während in den anderen Teilen noch nach Tagen vereinzelt

ein von der Kältewelle unabhängiges Steigen bestand (siehe Figur Seite 24). Wir zogen hieraus den Schluß, daß sich die Kaltluft nicht völlig wie eine schwere Masse bewege, sondern daß dieses nur in solchen Teilen der Kältewelle der Fall sei, in denen nicht durch die Bildung einer Depression Zusatzkräfte auftreten.

3. Während einerseits der Vorstoß einer Kaltluftmasse in einem Steiggebiete des Luftdruckes erfolgte, verlangsamte sich andererseits die Bewegung einer Kältewelle, wenn von Westen ein neues Fallgebiet heranzog. Dadurch entstand eine stoßweise Bewegung der Kaltluft. Es ist in dieser Arbeit nicht näher untersucht worden, ob sich in solchen Fällen im Fallgebiet immer Südwinde fanden. Es scheint dies jedoch am wahrscheinlichsten. Das Fallgebiet wie das Steiggebiet sind in der Regel nur die isallobarischen Ausdrücke für die Vorderseite, beziehungsweise die Rückseite einer Depression.

C) II. Einige Bemerkungen zu einer Arbeit von F. Gölles über den Luftdruckgang bei Kältewellen im Gebiete des Kaspischen Meeres.[6])

F. Gölles stellt sich die Aufgabe, aus dem Gange des Luftdruckes bei der Ankunft der Kaltluftmassen in der Umgebung des Kaspischen Meeres Schlüsse auf das Verhältnis zwischen der oberen (primären) und der unteren (sekundären) Druckwelle zu ziehen. Er geht also davon aus, daß die komplexe Natur der Luftdruckschwankungen bereits sicher erkannt worden ist. Nimmt man an, daß sich der Kälteeinbruch in Stationen, die nicht allzu weit voneinander entfernt liegen, ungefähr in derselben Weise vollzieht, so müßte auch der Gang des Luftdruckes in diesen Stationen übereinstimmen. Die tatsächlich vorhandenen Abweichungen geben den ersten Hinweis auf die obere Druckwelle. Der Vergleich mit dem Gang der anderen meteorologischen Elemente, ferner die Untersuchung ähnlicher Fälle wird weitere Anhaltspunkte an die Hand geben, die man zur Sicherstellung und weiteren Erkenntnis der oberen Druckwelle verwenden kann. In den Hauptpunkten stimmen die Ergebnisse der Göllesschen Arbeit mit unseren Resultaten überein. Er findet ebenfalls, daß nur die Annahme einer unteren und oberen Druckwelle den Druckverlauf bei den russischen Kältewellen genügend erklären kann. Der Verfasser hält dies Resultat für das hauptsächlichste beider Arbeiten, da es uns einen Einblick in die Natur des wichtigsten meteorologischen Elementes, nämlich des Luftdrucks, mit Hilfe von Methoden gibt, die durch die Anlehnung an die Synoptik augenblicklich wesentliche Vorzüge vor den anderen, in der Einleitung zu dieser Arbeit bereits kurz skizzierten Methoden bieten. Es ergeben sich jedoch auch einige Abweichungen in den Resultaten dieser und der Göllesschen Arbeit. Wir wollen sie kurz anführen.

Gölles sagt in seiner Arbeit, die obere Druckwelle habe das Bestreben, der unteren vorauszueilen. Dadurch erklärte er die Erscheinung, daß in den Stationen, die die Kältewelle zuerst erhielten, der Druckanstieg mit dem Einbruch der Kaltluft begann, während die Stationen, die von der Kältewelle erst einen Tag später erreicht wurden, bereits vor dem Einbruch der Kaltluft einen schwachen Barometeranstieg aufwiesen. Aus dieser Erscheinung allein kann man jedoch nicht auf das Verhältnis zwischen oberer und unterer Depression Schlüsse ziehen. Dies ist nur dann möglich, wenn der Kälteeinbruch am Erdboden in beiden Fällen auf der Rückseite einer Depression erfolgte. Die von Gölles benutzten Stationen erfüllten diese Voraussetzung nicht. Da die an die Vorderfront der Kältewelle geknüpfte Depression nicht mit der Kaltluft nach Süden, sondern nach Osten zieht, hätte er nicht Stationen auf demselben Meridian, sondern solche auf demselben Breitengrade vergleichen müssen, z. B. solche in Mittelrußland mit solchen in Westsibirien. Die am Nord- und Südende des Kaspischen Meeres eintretenden Druckverhältnisse, die Gölles vorzugsweise untersucht hat, geben uns aus diesen Gründen nicht den Zusammenhang zwischen der oberen und unteren Depression, sondern sie geben uns nur ein Beispiel, auf das wir unser Schema für den Vorstoß kalter Luft in einem Steiggebiet anwenden müssen. Wir sehen sofort, daß es die Erscheinung in vollem Umfange erklärt, wenn wir die Stationen am Nordende des Kaspischen Meeres in die Nähe des Fallgebietes, die am Südende jedoch in das sich nach Süden über die Kältewelle hinaus erstreckende Steiggebiet verlegen.

Die Bemerkungen, die Gölles über die Auslösung von Kälteeinbrüchen gemacht hat, scheinen zunächst in völligem Widerspruch zu den Resultaten zu stehen, die uns die Untersuchung der Steiggebiete bei russischen Kältewellen geliefert hat. Gölles fand, daß die Kältewellen durch ein Fallgebiet des Luftdruckes ausgelöst wurden, während die in dieser Arbeit vorgebrachten Tatsachen eher einen

Zusammenhang zwischen dem Steiggebiet des Luftdruckes und der Auslösung einer Kältewelle vermuten ließen. Die Differenz zwischen dem Resultate beider Arbeiten ist jedoch nicht so groß, wie es zunächst scheinen möchte. Wir fanden nämlich, daß ein Steiggebiet fast immer, wenn es mit der Auslösung einer Kältewelle zusammenfiel, an ein vorhergehendes Fallgebiet geknüpft war. Die Einheit von Steig- und Fallgebiet nannten wir ein System von Isallobaren. Die Bewegung der Kaltluftmasse vollzog sich in dem Steiggebiet. Ob sie aber auch dadurch hervorgerufen war oder ob ihre Auslösung im Sinne von Gölles eher an das vorhergehende Fallgebiet geknüpft war, wurde nicht entschieden. Man muß nämlich hierbei bedenken, daß ein zwingender Schluß auf die Dynamik des Vorganges weder in der Arbeit von Gölles noch in der hier vorliegenden möglich ist, da die Arbeitsmethoden ja für die Entscheidung einer ganz anders gearteten Frage zugeschnitten sind.

Aus diesem Grunde wurde in dieser Arbeit lediglich das eigentümliche Zusammenfallen der Auslösung eines Kälteeinbruchs mit dem Vorüberzug eines Systems von Isallobaren betont. Daraus und aus dem Fehlen von Kaltluftausbrüchen, die mit den Druckänderungen nicht in Zusammenhang gebracht werden konnten, kann man jedoch schließen, daß die Gründe für die Auslösung einer Kältewelle nicht in dem Bewegungszustand und der Lagerung einer Kaltluftmasse allein liegen können, sondern daß hierbei auch Vorgänge eine Rolle spielen müssen, die ursprünglich in keiner Beziehung zu der zur Auslösung kommenden Kältewelle standen.

Literaturverzeichnis.

1) A. Defant: Über die Beziehung der synoptischen Luftdruckänderungen zu den Temperaturverhältnissen der Atmosphäre. Sitzungsber. Akad. Wiss. Wien, Bd. 119, 1910.

2) F. M. Exner: Über die Ausbreitung kalter Luft auf der Erdoberfläche. Sitzungsber. Akad. Wiss. Wien, Bd. 127, 1918.

3) H. von Ficker: Beziehungen zwischen Änderungen des Luftdruckes und der Temperatur in den unteren Schichten der Troposphäre (Zusammensetzung der Depressionen). Sitzungsber. Akad. Wiss. Wien, Bd. 129, 1920.

4) H. von Ficker: Die Ausbreitung kalter Luft in Rußland und Nordasien. Sitzungsber. Akad. Wiss. Wien, Bd. 119, 1910.

5) H. von Ficker: Die Verdoppelung (Teilung) von Kältewellen. Met. Zeitschrift 1921, S. 85.

6) F. Gölles: Untersuchungen über den Luftdruckgang bei Kältewellen im Gebiete des Kaspischen Meeres. Met. Zeitschrift 1922, S. 97.

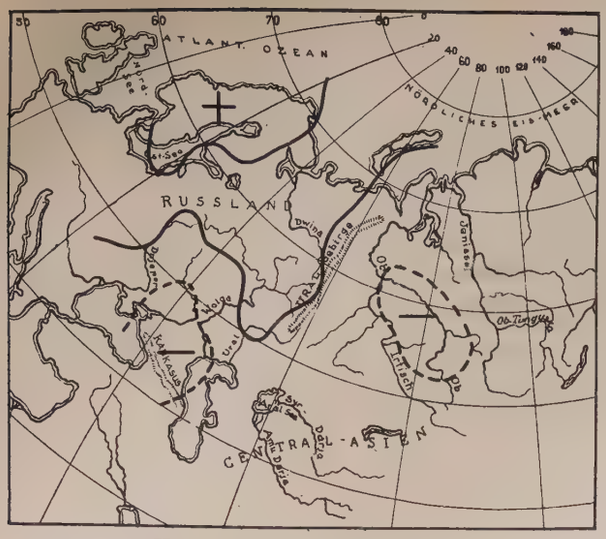
7) W. König: Über die Erschließung hoher Druckwellen durch Änderungskarten. Bericht über die Tätigkeit des Preuß. Meteorol. Instituts im Jahre 1927, S. 56.

8) W. Peppler: Zyklonengruppen und Bahnen der barometrischen Fallgebiete. Das Wetter 1922, S. 92.

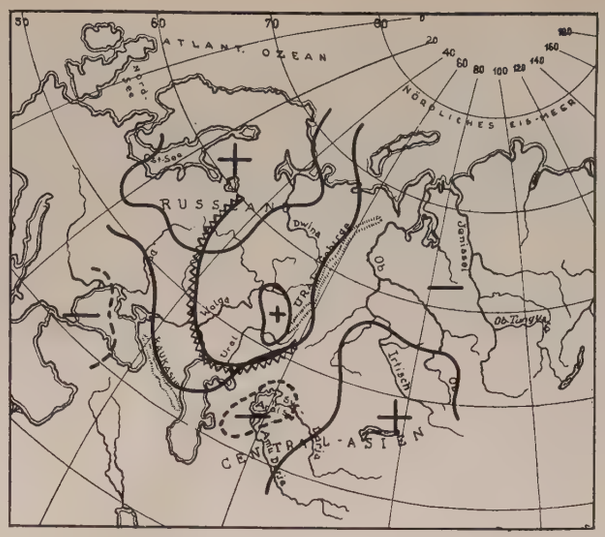
9) W. Schostakowitsch: Bedeutung des Windes für das Klima Ostsibiriens. Met. Zeitschrift 1927, S. 101.

Bemerkung zu den Isallobarenkarten.

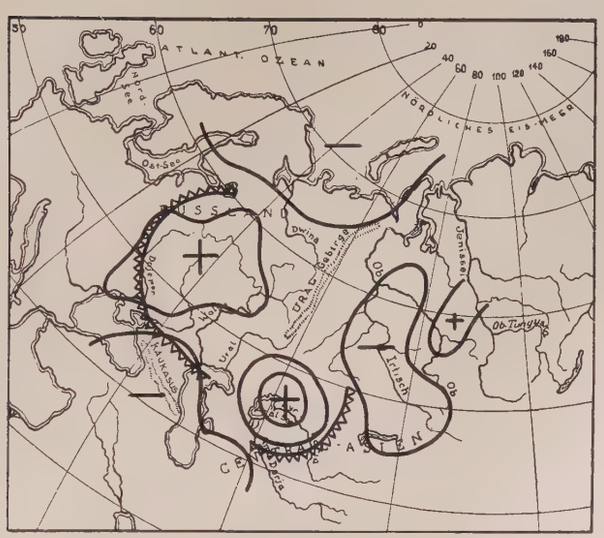
Die Isallobaren sind von 5 zu 5 mm gezeichnet worden. Eine ausgezogene Linie (————) verbindet die Orte mit Barometeranstieg. Die ausgezogene Isallobare, die unmittelbar an ein Fallgebiet grenzt, ist die Nullinie. Die Isallobaren der Fallgebiete sind durch gestrichelte Linien (— — — —) dargestellt. Die Vorzeichen der Barometeränderung sind immer dahin gesetzt worden, wo sich ein Maximum der Änderung befand. Kleinere Zentren, deren Lage aus dem Verlauf der Isallobaren nicht mehr zu entnehmen ist, sind noch durch die Lage des betreffenden Vorzeichens angedeutet. Die gezackte Linie (ΔΔΔΔΔΔΔΔ) gibt die Lage der Isochrone des Kälteeinbruches für den Morgentermin des letzten zur Berechnung der Barometeränderung benutzten Tages an, aber nur so weit, wie sie in einem Steiggebiet verläuft. Die Zacken sind nach der Fortschreitungsrichtung der Kaltluftmasse gerichtet.



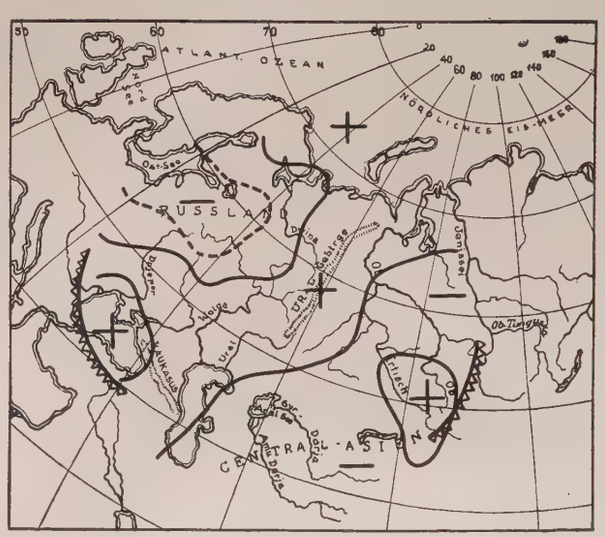
Karte 1. 16./17. Februar 1899.



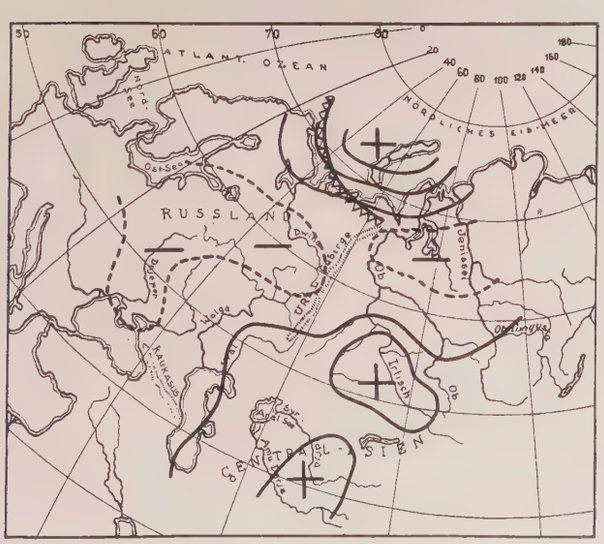
Karte 2. 17./18. Februar 1899.



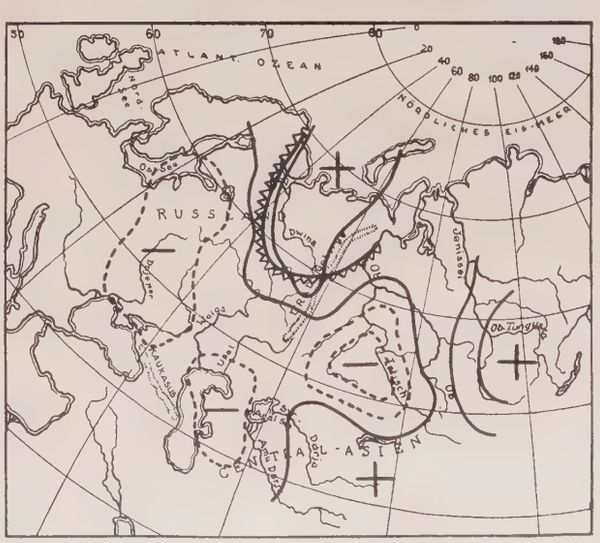
Karte 3. 18./19. Februar 1899.



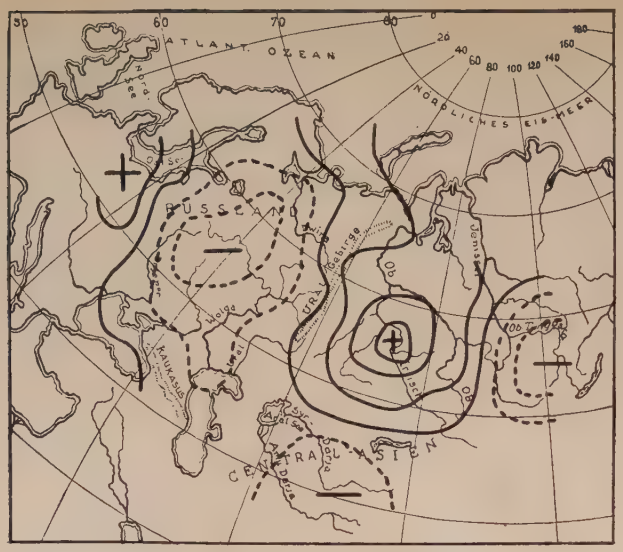
Karte 4. 19./20. Februar 1899.



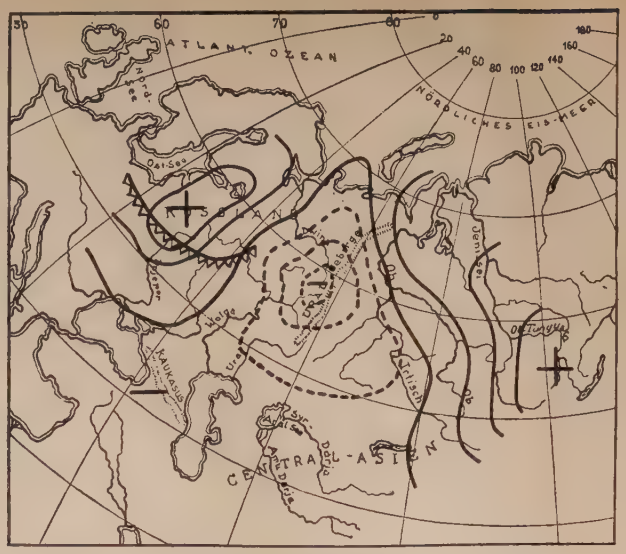
Karte 5. 9./10. Mai 1899.



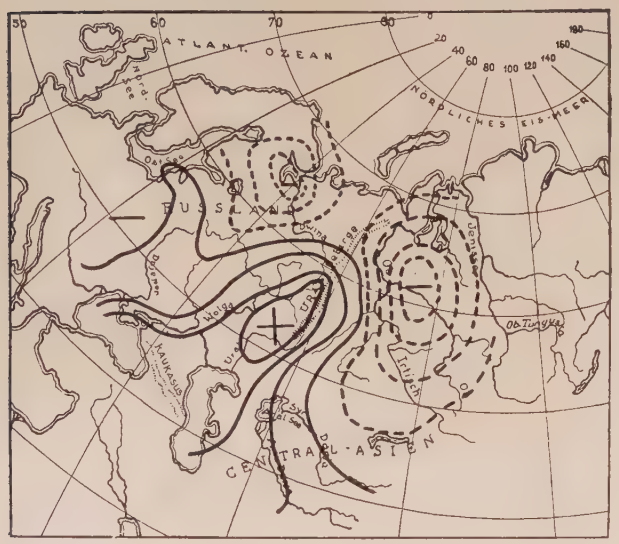
Karte 6. 10./11. Mai 1899.



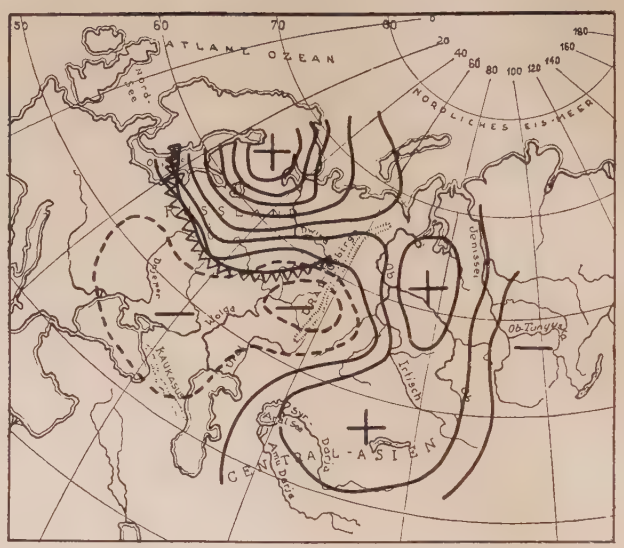
Karte 7. 11./12. Mai 1899.



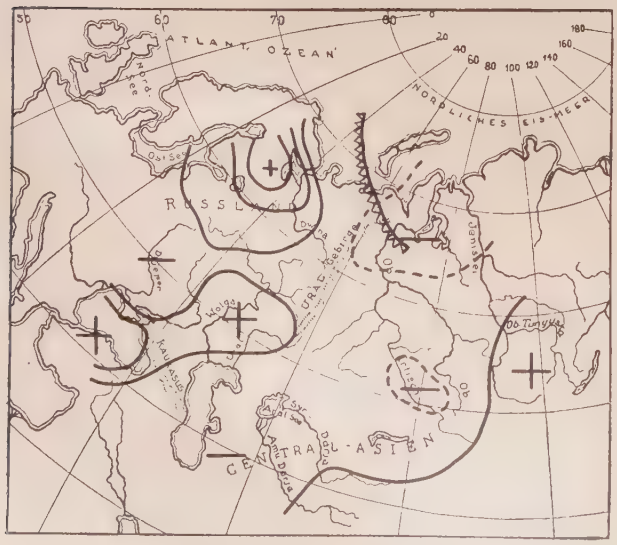
Karte 8. 12./13. Mai 1899.



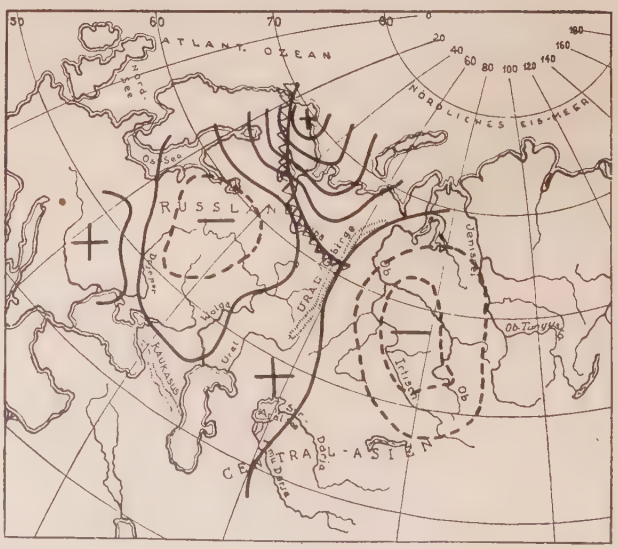
Karte 9. 16./17. Februar 1902.



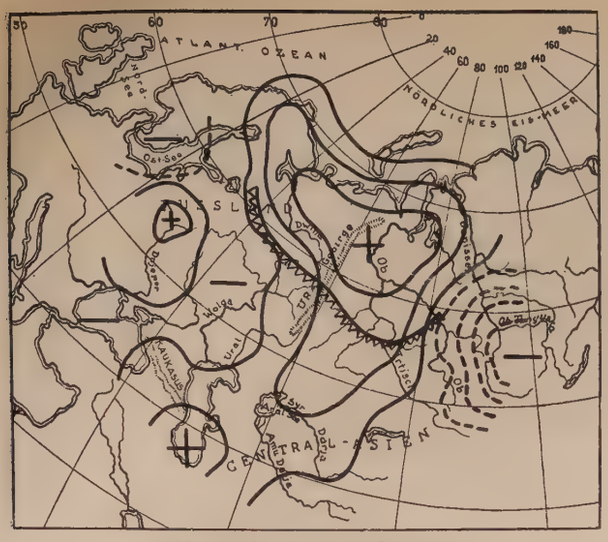
Karte 10. 17./18. Februar 1902.



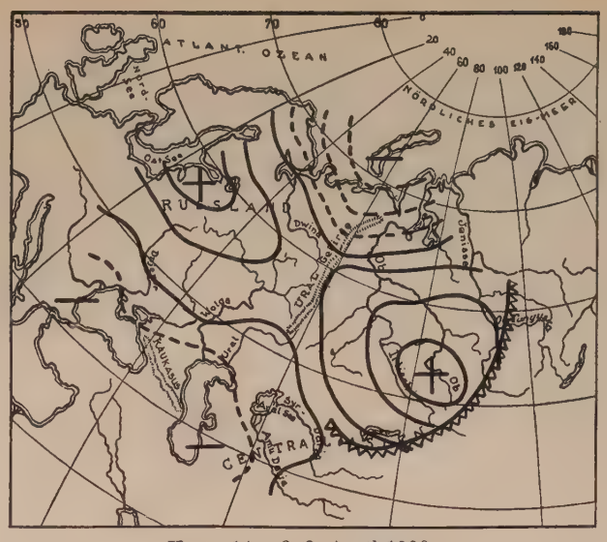
Karte 11. 30./31. März 1900.



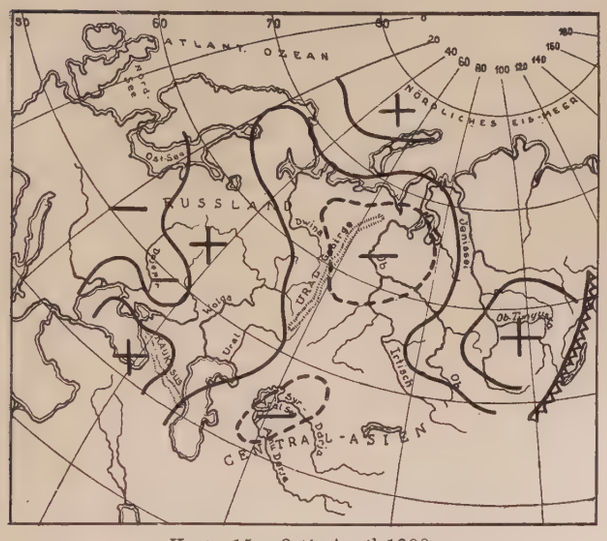
Karte 12. 31. März/1. April 1900.



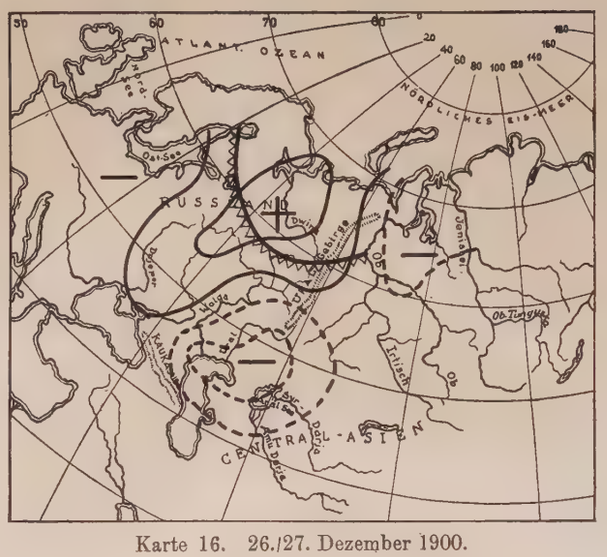
Karte 13. 1./2. April 1900.



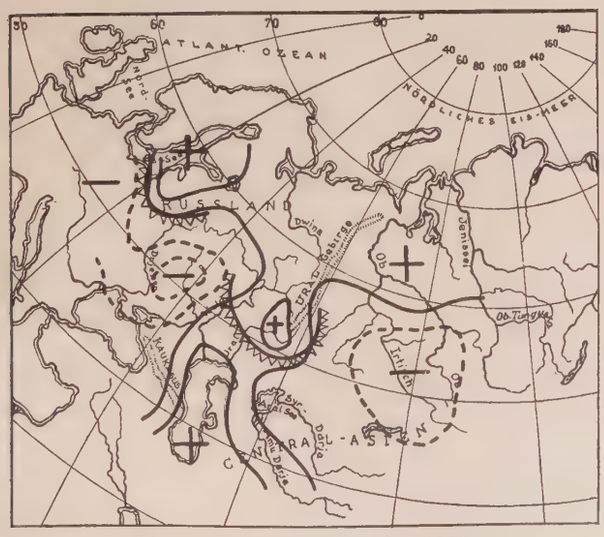
Karte 14. 2./3. April 1900.



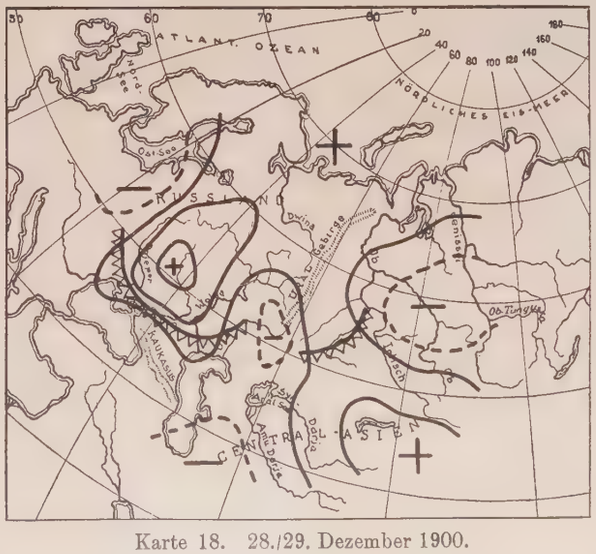
Karte 15. 3./4. April 1900.



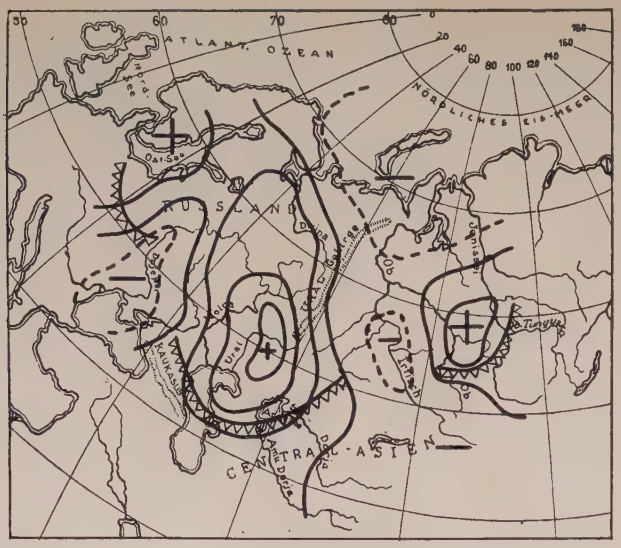
Karte 16. 26./27. Dezember 1900.



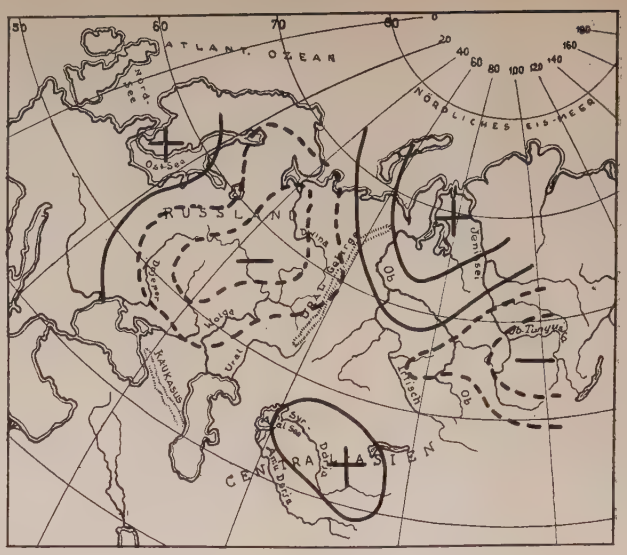
Karte 17. 27./28. Dezember 1900.



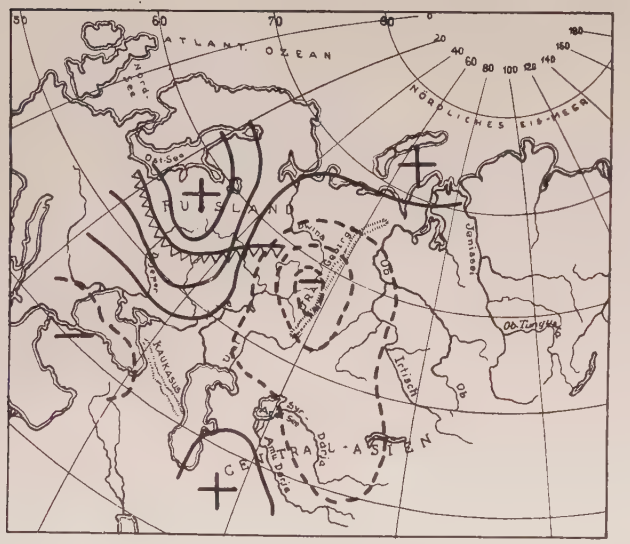
Karte 18. 28./29. Dezember 1900.



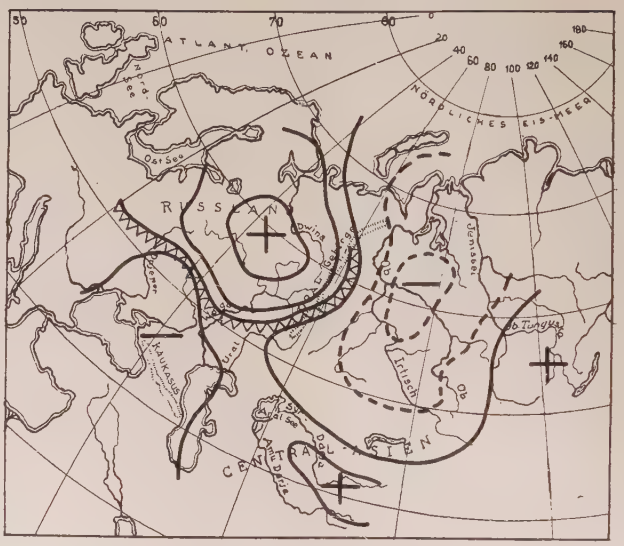
Karte 19. 29./30. Dezember 1900.



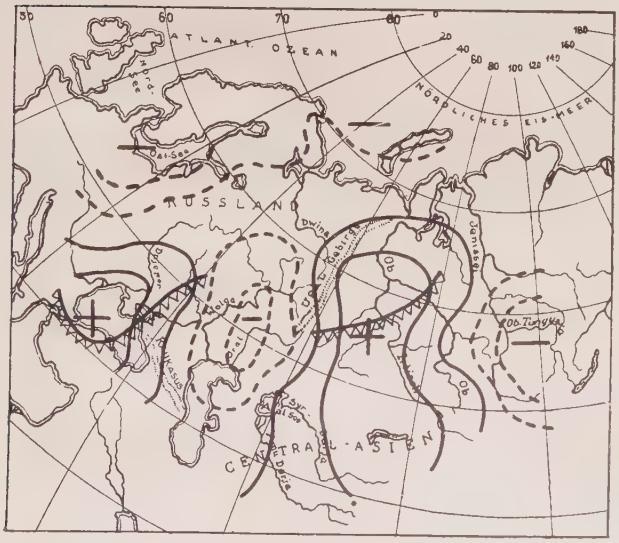
Karte 20. 13./14. Februar 1900.



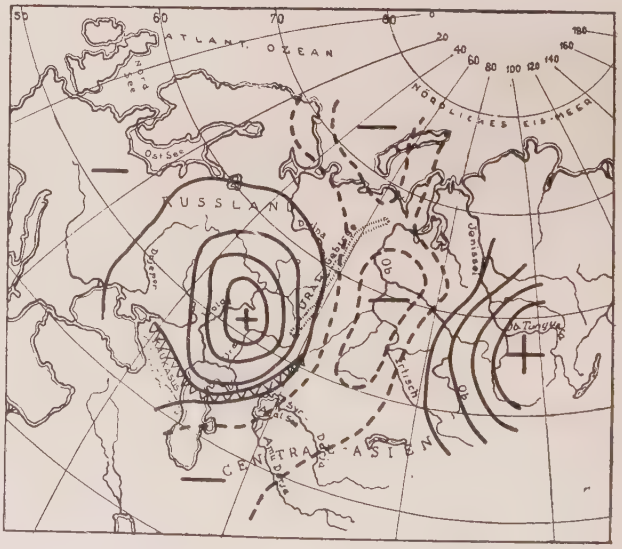
Karte 21. 14./15. Februar 1900.



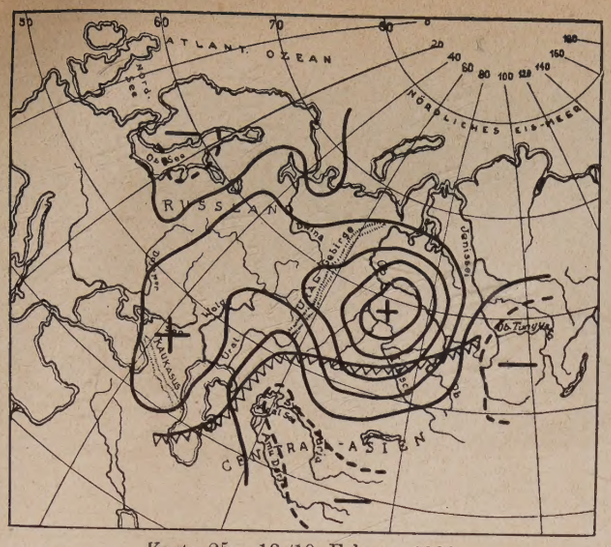
Karte 22. 15./16. Februar 1900.



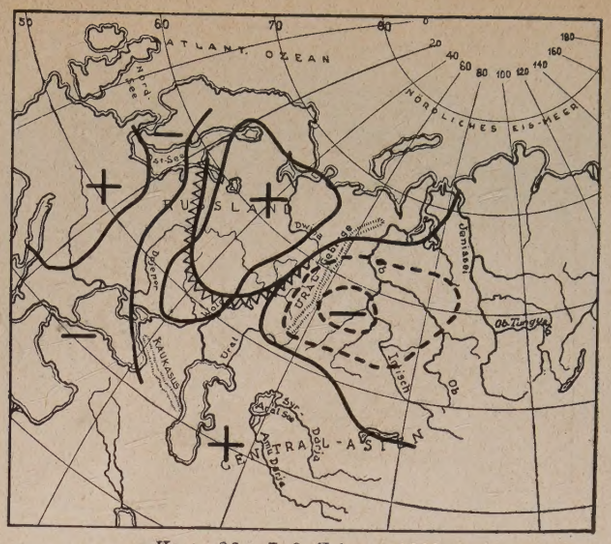
Karte 23. 16./17. Februar 1900.



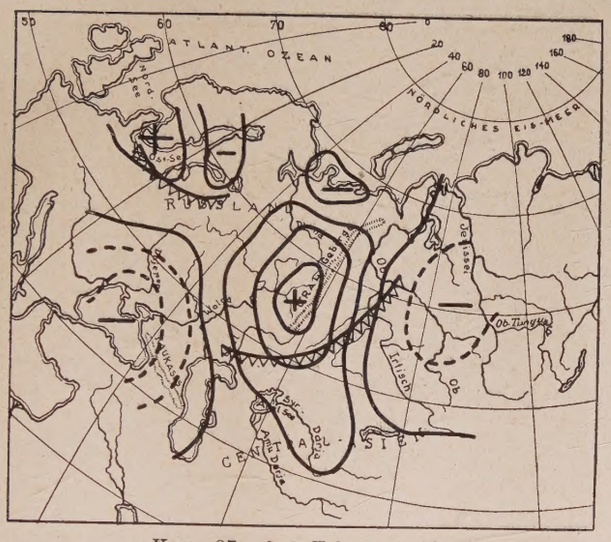
Karte 24. 17./18. Februar 1900.



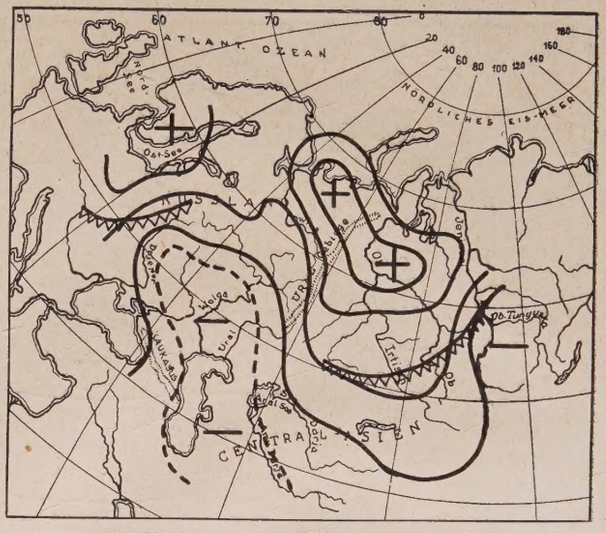
Karte 25. 18./19. Februar 1900.



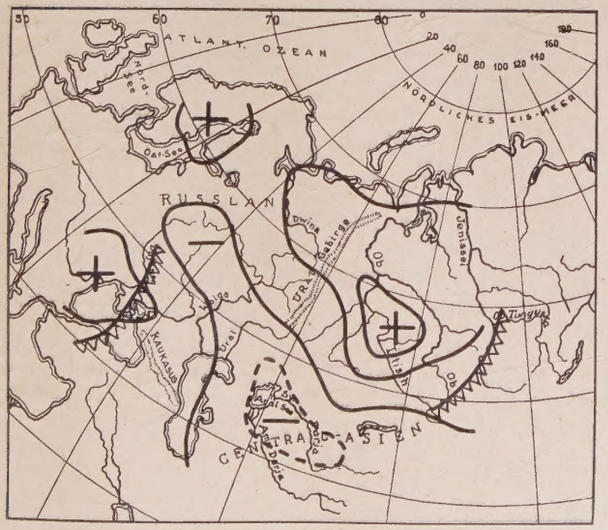
Karte 26. 7./8. Februar 1898.



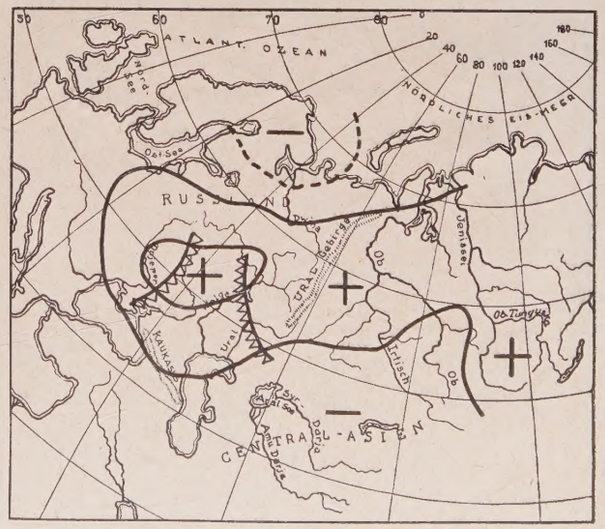
Karte 27. 8./9. Februar 1898.



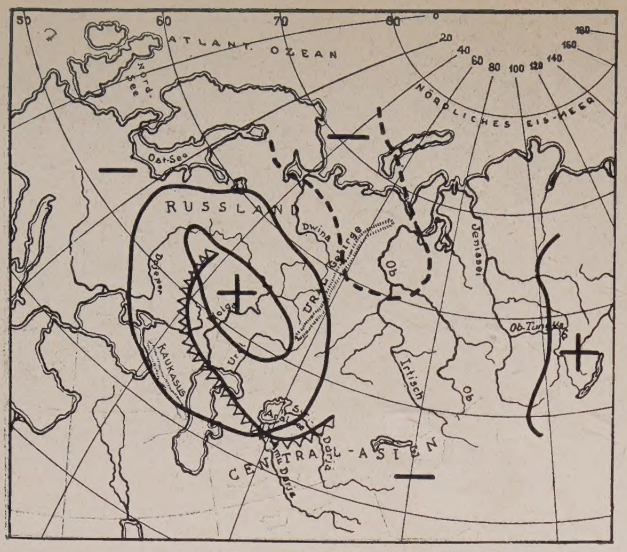
Karte 28. 9./10. Februar 1898.



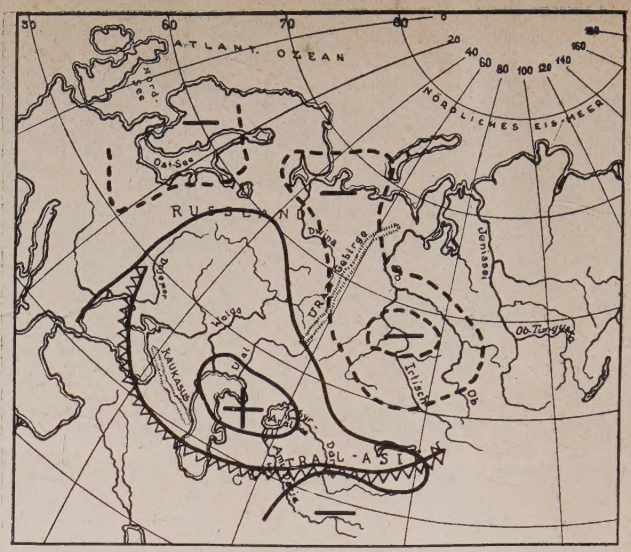
Karte 29. 10./11. Februar 1898.



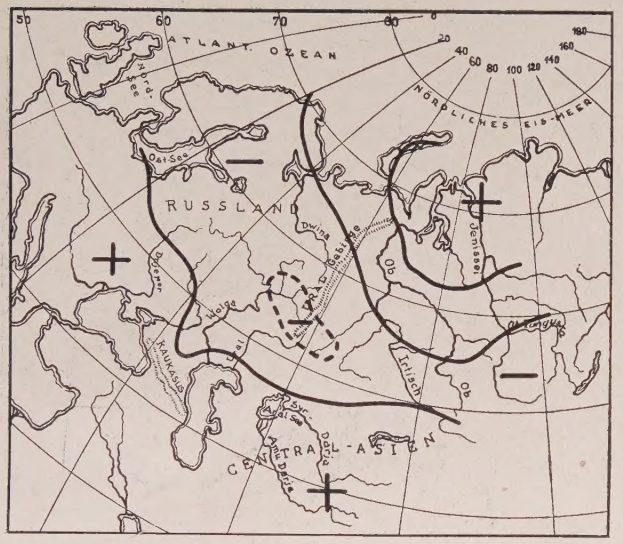
Karte 30. 11./12. Februar 1898.



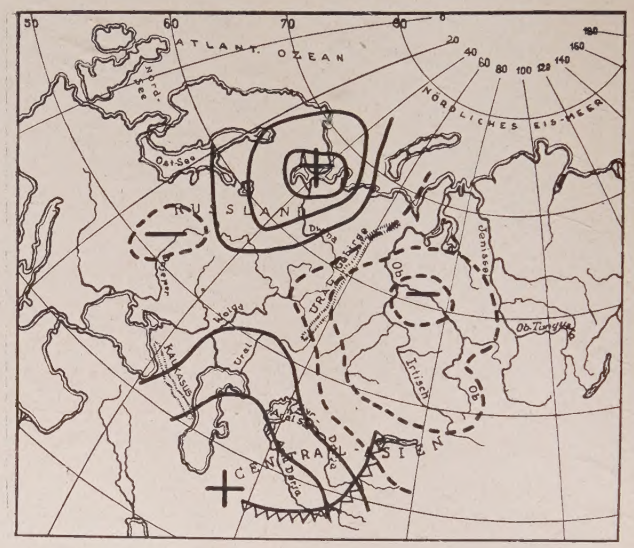
Karte 31. 12./13. Februar 1898.



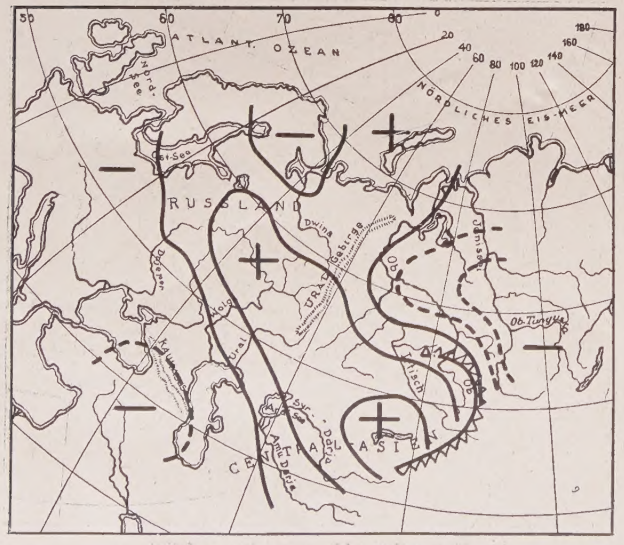
Karte 32. 13./14. Februar 1898.



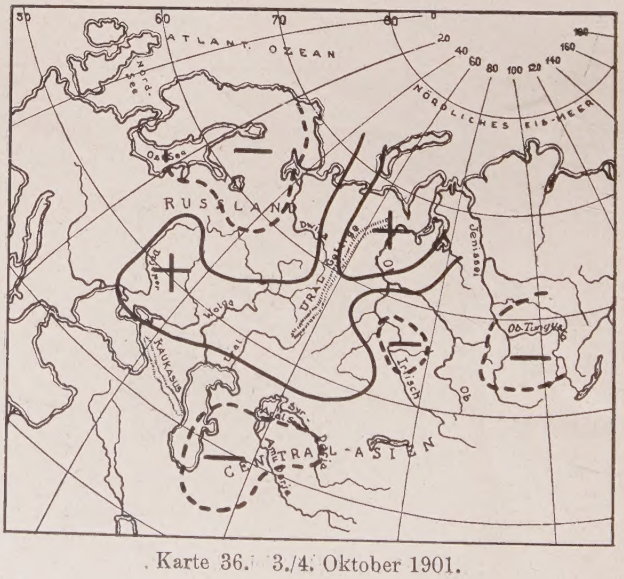
Karte 33. 14./15. Februar 1898.



Karte 34. 1./2. Oktober 1901.



Karte 35. 2./3. Oktober 1901.



Karte 36. 3./4. Oktober 1901.

Lebenslauf.

Am 29. November 1904 wurde ich zu Burgdorf, Kreis Celle, als Sohn des Rektors Karl Wagemann geboren. In Bebra bei Kassel, wo meine Eltern jetzt wohnen, bereitete mich mein Vater zur Aufnahme in die Untertertia des Gymnasiums zu Hersfeld vor. Dort bestand ich Ostern 1923 die Reifeprüfung. Ich studierte in Göttingen, Halle und Berlin, und zwar hauptsächlich Physik, Mathematik, Meteorologie, Geophysik und Ozeanographie. Vorlesungen hörte ich vornehmlich bei den Herrn Professoren und Dozenten: Angenheister, Bartels, Bieberbach, Born, Courant, Defant, von Ficker, Franck, Hergesell, Hilbert, Jung, Knoch, Heinrich Maier, Meyermann, Pohl, Runge, Wehnelt, Wiechert und Wigand. Ich bin ihnen allen zu Dank verpflichtet, besonders Herrn Professor von Ficker, der mich jederzeit bei der Abfassung meiner Dissertation mit Rat und Tat unterstützt hat.

Die Promotionsprüfung bestand ich am 7. Februar 1929.